

近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力

王志刚^{1,3}, 赵永存¹, 廖启林², 黄 标^{1,*}, 孙维侠¹, 齐雁冰¹, 史学正¹, 于东升¹

(1. 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;

2. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过比较 1980 年和 2003 年江苏省土壤 pH 空间分布图,发现虽然两个时期土壤 pH 空间分布的基本格局仍然相似,表现为南酸北碱,但局部地区也存在较大的变化,主要表现为酸化。沂沭岗地浅洼平原土区、里下河浅洼地土区、宁镇扬低山丘陵土区和太湖平原土区均有较严重的酸化出现。分析发现前两者主要受不合理施肥、田间管理和土地利用及种植类型变化的影响,后两者除以上的影响因素外还包括工业化和城市化。另外在后两者和宜溧洞庭山地土区由于土地利用和种植方式的变化、建筑和道路的兴建,还导致了局部地区土壤 pH 有所上升。土类中潮土酸缓冲性能强、pH 变化不大,水稻土 pH 下降严重,特别是里下河浅洼地土区水稻土,在现有的管理利用方式下,继续下降的可能性很大。

关键词:土壤 pH; 时空变化; 驱动因素; 江苏省

文章编号:1000-0933(2008)02-0720-08 中图分类号:Q149, S181, X142, X171.4 文献标识码:A

Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China

WANG Zhi-Gang^{1,3}, ZHAO Yong-Cun¹, LIAO Qi-Lin², HUANG Biao^{1,*}, SUN Wei-Xia¹, QI Yan-Bing¹, SHI Xue-Zheng¹, YU Dong-Sheng¹

1 State Key Lab of Soil and Sustainable Agriculture Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0720 ~ 0727.

Abstract: The changes of soil pH significantly affect soil chemical properties and even whole environmental ecosystems. For this reason, the studies on them have attracted and continue to attract much academic attention. Especially the soil acidification is being accelerated with rapid industrial development and unreasonable farming practices, which has led to a great deal of eco-environmental problems. Some authors have conducted much research on the effects of some unique affecting factors on soil pH changes in some relatively uniform regions. However, in-situ studies of their comprehensive effects on soil pH changes in some complex regions have been seldom investigated. In this study, the spatio-temporal variation and associated factors which affect soil pH changes of Jiangsu province with high rapid industrial development and

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2007262; BK2006581);江苏省国土生态地球化学调查资助项目(20031230008);中国地质科学院生态地球化学开放实验室资助项目(KL05-15)

收稿日期:2006-12-07; **修订日期:**2007-04-29

作者简介:王志刚(1981~),男,湖北襄樊人,博士生,主要从事地理信息系统、土壤地球化学研究. E-mail: wzg592@tom.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bhuang@issas.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2007262, BK2006581), Land Ecogeochemical Investigation in Jiangsu Province (No. 20031230008) and Key Lab of Ecogeochemistry (Chinese Academy of Geological Sciences) (No. KL05-15)

Received date:2006-12-07; **Accepted date:**2007-04-29

Biography: WANG Zhi-Gang, Ph. D. candidate, mainly engaged in GIS, soil geochemistry. E-mail: wzg592@tom.com

dense population were discussed by comparing the two spatial distribution maps of soil pH in 1980 and 2003. The results showed that the spatial distribution pattern of soil pH in 2003 was similar to that in 1980 with lower soil pHs in the south part of the province than those in the north because of the difference of soil types. However, significantly decreasing changes were also observed in some local regions from 1980 to 2003. Intensively acidified soils were identified in Yishu mound and depressed plain soil region, Lixiahe depressed plain soil region, Ningzhenyang low mountain and undulated soil region, and Taihu Lake plain soil region. In the former two regions the dominant affecting factors on decreased soil pH are farming practices such as fertilizing, incorporation of crop residues and soil utilization. As for the latter two, besides farming practices, industrialization and urbanization also are main affecting factors. Soil pH has increased in some areas of Ningzhenyang low mountain and undulated soil region and Taihu Lake soil region mainly due to soil utilization changes, structures, and road construction. Among soil groups, pH changes of Fluvo-aquic soils in the past 20 years were not significant, but those in paddy soils significantly decreased, particularly in the Lixiahe depressed plain soil region where decreasing trend of soil pH may be accelerated. This is because acidic buffering capacity of Fluvo-aquic soils is greater than that of paddy soils. In conclusion, farming practices, industrialization and urbanization are important affecting factors of soil pH changes and have led to significant changes in some local regions. In order to the soil sustainable utilization in rapid economic developing regions, the government must mention the soil pH changes and take some effective measures to adjust and guide agriculture and industry so that the sparse soil resources in the densely populated area can be appropriately utilized.

Key Words: soil pH; spatio-temporal variation; affecting factors; Jiangsu Province

土壤酸碱性是土壤许多化学性质的综合反映,土壤中几乎所有的反应和过程都涉及到氢离子的传递和转换,它对土壤的其它一系列性质以及整个生态环境都有着深刻的影响^[1]。自然状态下的土壤酸碱性主要受成土因子控制,其酸化的过程是十分缓慢的^[2],pH 每下降一个单位往往需要上百年甚至上千年的时间。所以,经过了漫长的地质大循环和生物小循环的作用后,才在我国南北气候差异大的条件下,形成了稳定的地带性土壤南酸北碱的格局。

现代工业的飞速发展以及不合理的农业生产方式将导致土壤酸碱性空间分布和演变方向的改变,特别是加速土壤酸化进程。近几十年来,土壤酸化已经成为一个严重的世界性的生态环境问题,在我国南方这个问题也已相当严重^[3]。然而,已有的研究主要是就某些单独的影响因素或者相对单一的区域进行讨论^[2,4~7],而对原位的各种因素综合效应的研究和在综合效应中各单个因素的分效应,或者复杂区域间对比的研究相对较少。

江苏省地处长江三角洲地区,农业历史悠久,改革开放 20 多年来现代化工业和农业的迅猛发展使得该地区的生态环境已经受到了人为活动的强烈干扰。在这样的背景下,本文按区域和土壤类型,对比研究了该省土壤 pH 的时空变化,并探讨了其自然影响因素和人为驱动因子,对于指导江苏省及类似地区的工农业生产及其布局、制定土壤酸化控制对策等都具有重要的理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

江苏省位于我国大陆东部,北纬 30°46'~35°07',东经 116°22'~121°55'之间,东滨黄海,地处长江、淮河下游,跨北亚热带与暖温带。江苏省地势平坦,地形除西部及北部有丘陵低山分布外,绝大部分均系近代河流沉积而形成的平原,在平原之中又有以太湖和里下河为中心的许多湖沼洼地。由于沉积物类型与成土时间以及水文地质状况的差异,该省土壤类型及其组合规律在地区上的变化突出(图 1)^[8]。

江苏省的地带性土壤主要为棕壤、褐土、黄棕壤和红壤。棕壤和褐土主要分布在沂沭岗地浅洼平原土区(图 1)^[9]。黄棕壤主要分布在宁镇扬低山丘陵土区。红壤分布于宜溧洞庭山地土区。非地带性土壤中面积

较大的为水稻土、潮土和盐土,其中水稻土和潮土均占全省土壤总面积的约 39%,前者主要分布在里下河浅洼地土区、沿江平原土区和太湖平原土区,后者主要分布在徐淮黄泛平原土区和沿江平原土区。盐土约占全省土壤总面积的 7%,主要分布在苏北滨海平原土区。其他几类非地带性土壤,砂姜黑土、基性岩土、石灰岩土、沼泽土和紫色岩土类面积均较小,其中砂姜黑土和紫色岩土类分布在沂沭岗地浅洼平原土区,基性岩土集中分布在宁镇扬低山丘陵土区北部,沼泽土分布在里下河浅洼地土区,石灰岩土零散地分布在宁镇扬低山丘陵土区。

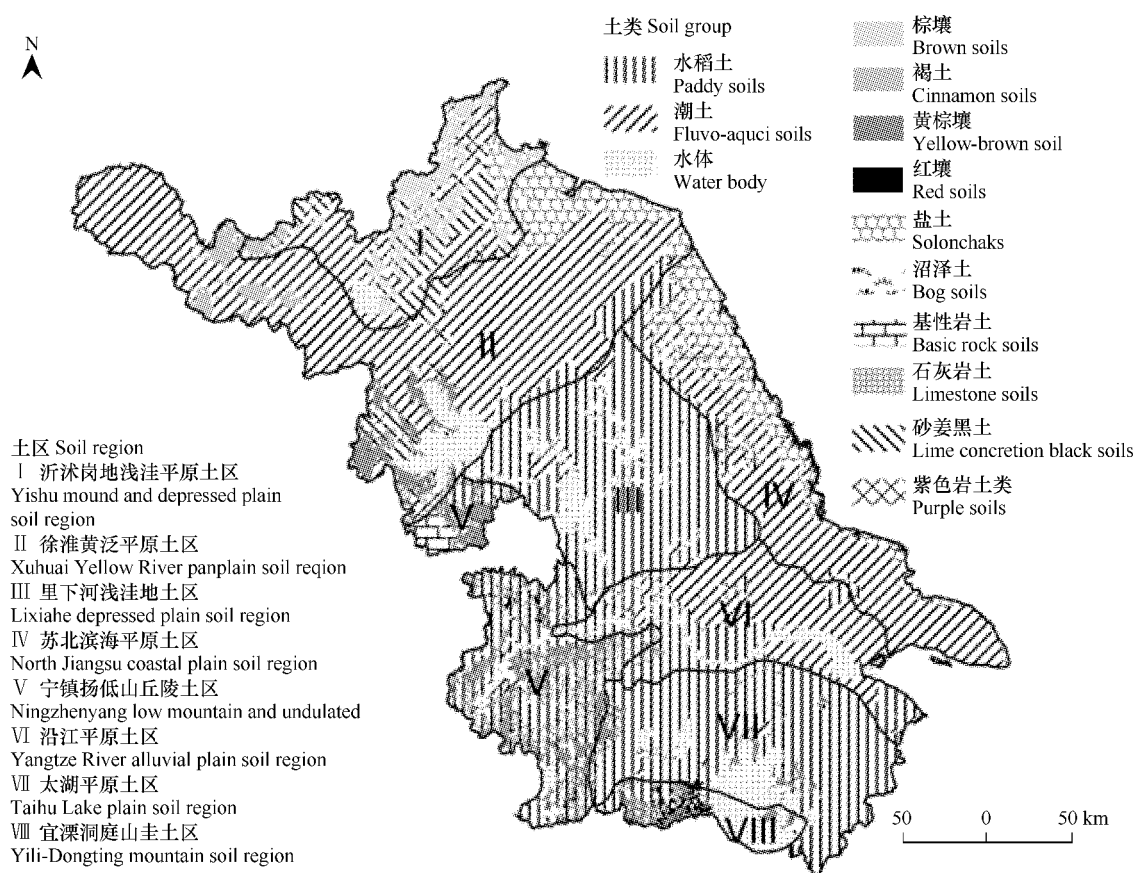


图 1 江苏土壤类型分布及土壤区划

Fig. 1 Soil map and soil regionalization of Jiangsu Province

1.2 数据来源与处理

1980 年土壤 pH 引自《中国土种志》^[10]和《江苏土种志》^[11]记载的共 154 个剖面表层的 pH。由于全国第二次土壤普查的采样点位置没有经纬度信息,很难准确确定其坐标,因此插值方法难以应用。本研究中采用目前为止相对最为精确的基于土壤学专业知识的方 (Pedological Knowledge Based method, PKB)^[12],根据土壤成土母质相同或相近、土壤类型一致与相似性、土壤剖面点位置与分布区域一致或邻近等原则,把采样点土壤 pH 与江苏省 1:20 万数字化土壤图的各个图斑相连接并转换为栅格格式以便进行分析。

2003 年样品以每 km²采集一个表层 (0 ~ 20cm) 土壤样品,4 个相邻位置的样品混合后作为一个混合样品,采用玻璃电极法测定土壤 pH 值 (土水比为 1:2.5)。2003 年的采样点均采用了 GPS 定位,土壤 pH 的空间分布采用 kriging 插值方法实现点面空间拓展。

土壤 pH 的时空变化图通过求算 2003 年土壤 pH 空间分布图与 1980 年空间分布图的差值来获取。面积统计中的 pH 分级采用《中国土壤》中的分级方法将土壤 pH 分为 5 级^[1]:强酸性, pH ≤ 5;酸性, pH 5.0 ~ 6.5;中性, pH 6.5 ~ 7.5;碱性, pH 7.5 ~ 8.5;强碱性, pH ≥ 8.5。土壤 pH 变化也分为 5 个级别: pH 变化 ≤ -1, pH

变化在 $-1 \sim -0.3$ 间, pH 变化在 $-0.3 \sim 0.3$ 间为基本不变(自然波动和测量误差引起)^[13], pH 变化在 $0.3 \sim 1$ 间, pH 变化 ≥ 1 。

2 结果

2.1 不同土区土壤 pH 的时空变化

1980 年与 2003 年江苏省土壤 pH 均大致以长江为界表现为北高南低,即南酸北碱(图 2)。

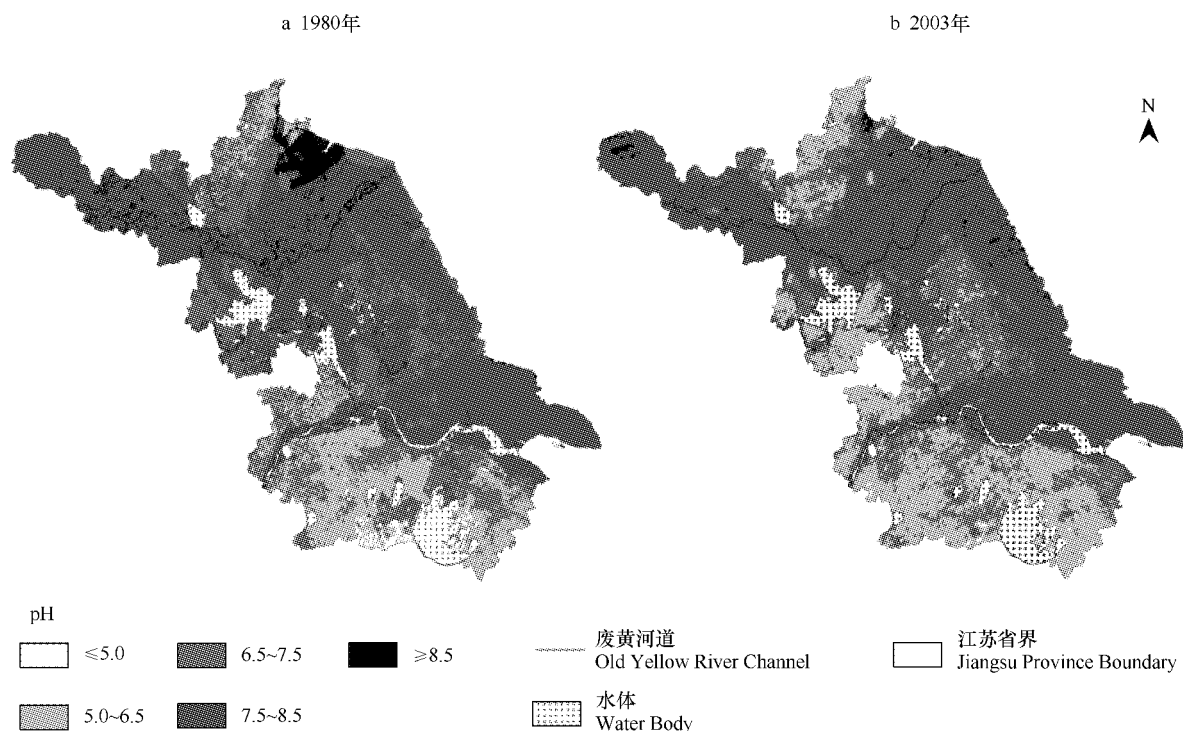


图 2 江苏省土壤 pH 的空间分布

Fig. 2 Distribution maps of soil pH in 1980 and 2003

20a 来江苏省土壤总体上表现出酸化的趋势(图 3a), pH 降低的土壤面积占全省土壤面积的百分比最高。由图 3b 可发现, pH 基本不变的土壤主要分布在徐淮黄泛平原土区的西北角和苏北滨海平原土区。pH 上升的土壤多集中在宁镇扬低山丘陵土区和太湖平原土区。pH 下降的土壤在江苏省分布较广,其中沂沭岗地浅洼平原土区、里下河浅洼地土区、宁镇扬低山丘陵土区和太湖平原土区出现了较为严重的酸化(图 3b)。

这些变化最终导致了局部地区土壤 pH 空间分布的变化(图 2b),与 1980 年相比 2003 年沂沭岗地浅洼平原土区酸性土壤面积扩大,中性面积缩小;里下河浅洼地土区碱性土壤面积减少,中性、酸性土壤面积增加;宁镇扬低山丘陵土区中性土壤基本消失,酸性土壤面积增大;太湖平原土区酸性土壤面积也有所增加。总之,虽然 2003 年土壤 pH 的总体空间分布仍维持了与 1980 年类似的南酸北碱格局,但局部地区变化较大,主要表现为酸性土壤面积增大。

2.2 不同土壤类型土壤 pH 变化

江苏省的潮土和水稻土的面积大、分布广。近 20a 来,潮土各 pH 级别土壤面积变化不大,而水稻土中性及以上 pH 级别的土壤面积减小,酸性及以下 pH 级别的土壤面积增大,表现出较强的酸化趋势,因此水稻土对于江苏省土壤 pH 近 20a 的变化起着主导作用。江苏省的水稻土大致可以划分为 4 个地区,即里下河地区水稻土、太湖地区水稻土、沿江地区水稻土和其它地区水稻土,其中里下河地区水稻土 20a 来 pH 降低的面积百分比最大(图 4), pH 降低幅度也最大(图 3b),该区水稻土 1980 年以碱性为主,到 2003 年则以中性为主。太湖地区水稻土 1980 年以酸性为主,20a 来该区土壤 pH 也有所下降,但降幅不及里下河地区水稻土,到 2003

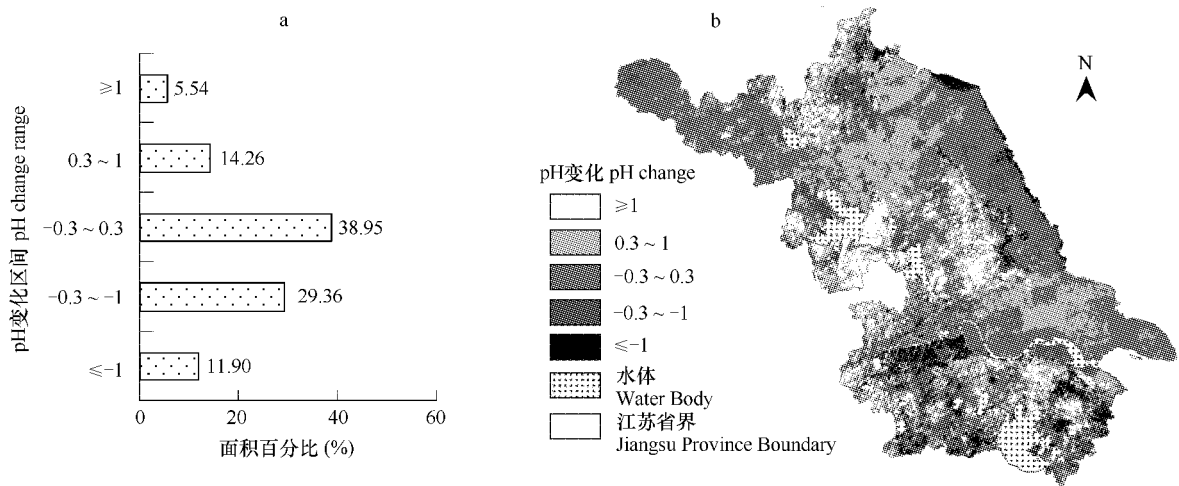


图3 近20a 江苏土壤 pH 变化及变化面积百分比统计

Fig. 3 Area percentages of different pH change ranges (a) and the grouped distribution map of soil pH changes (b) in the past 20 years

年该区水稻土仍以酸性为主。沿江地区水稻土各 pH 级别土壤面积近 20a 来基本没有变化。其它地区水稻土 20a 来也呈酸化趋势,但降幅不及里下河地区水稻土。导致几个不同地区水稻土 pH 变化差异的原因,一方面可能是由于 pH 变化驱动因素不同;另一方面,这 3 个地区水稻土原始 pH 和盐基或碱性物质含量不同造成的,具体原因还有待进一步研究。

表 1 1980 和 2003 年江苏省各土类不同 pH 级别土壤面积占其土类总面积百分比统计 (%)

Table 1 Area percentages of varying pH for soil groups in 1980 and 2003 (%)

pH	潮土 Fluvo-aquic soils		水稻土 Paddy soils		盐土 Solonchaks		棕壤 Brown soils		褐土 Cinnamon soils		黄棕壤 Yellow-brown soils	
	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003
	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003
≤ 5.0	0	0	0.1	0.1	0	0	6.2	0.3	0	0	14.2	1.9
5.0 ~ 6.5	1.7	3.2	25.6	37.2	0	0.3	29.4	61.4	0	0.7	45.1	66.6
6.5 ~ 7.5	4.1	4.9	32.0	38.8	17.2	1.0	61.2	29.7	2.4	17.5	28.2	25.4
7.5 ~ 8.5	92.3	91.2	42.3	23.9	52.4	95.0	3.2	7.9	75.6	81.8	12.5	6.2
≥ 8.5	1.8	0.7	0	0	30.4	3.8	0	0.8	22.0	0	0	0

pH	红壤 Red soils		砂姜黑土 Lime concretion black soils		沼泽土 Bog soils		基性岩土 Basic rock soils		紫色岩土类 Purple soils		石灰岩土 Limestone soils	
	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003
	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003	1980	2003
≤ 5.0	61.8	4.4	0.1	0	0	1.9	0	0	0	1.6	1.1	0.3
5.0 ~ 6.5	38.2	71.0	0.6	19.8	41.3	30.1	0	77.5	0	54.7	33.0	26.2
6.5 ~ 7.5	0	20.5	76.5	52.8	58.6	44.8	76.6	22.5	92.4	36.1	55.1	50.9
7.5 ~ 8.5	0	4.1	22.7	27.4	0	23.2	23.4	0	6.8	7.6	10.8	22.6
≥ 8.5	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3 讨论

土壤酸碱性时空变化取决于外界致酸致碱因素及土壤本身抵制酸碱变化的能力,下面就这两个方面对江苏省土壤 pH 近 20a 的时空变化加以讨论。

3.1 土壤酸碱缓冲能力

土壤本身抵制酸碱变化的能力以土壤的物质组成和地球化学性质为基础,因此不同类型土壤的酸碱缓冲性能也不同。潮土和盐土一般被认为酸缓冲性能较强,而水稻土被认为酸缓冲性能较弱^[4]。另外,土壤处于中性(pH6.5 ~ 7.5)和酸性(pH6.5 ~ 5)范围,特别是中性范围时,对酸性物质的输入比较敏感^[14],江苏省 4

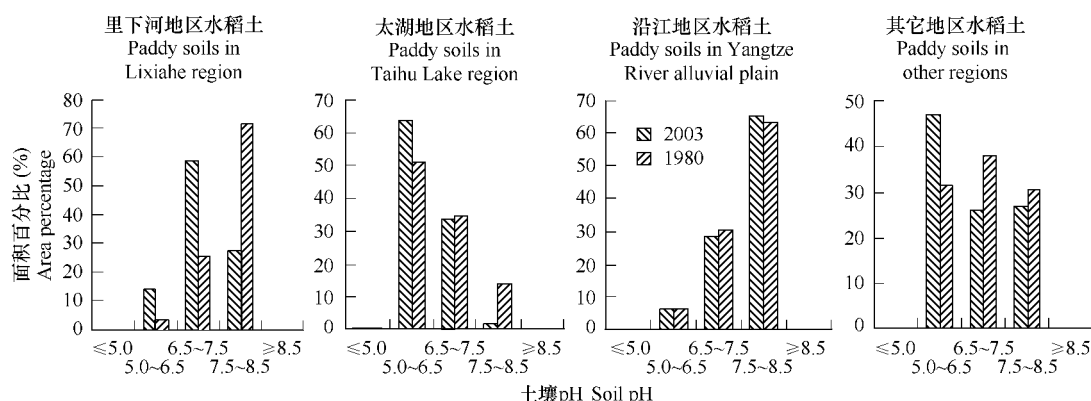


图4 1980 和 2003 年不同地区水稻土 pH 分级面积百分比统计

Fig. 4 Area percentages in different pH ranges of paddy soils for different regions of Jiangsu Province in 1980 and 2003

个出现土壤较严重酸化的土区在 1980 年均分布有大量的中性土壤(图 2a)。到 2003 年沂沭岗地浅洼平原土区、宁镇扬低山丘陵土区和太湖平原土区的大部分土壤已呈酸性,而里下河浅洼地土区的绝大部分土壤转变成中性。如果不采取有力措施对导致土壤酸化的因素加以控制,这些土区土壤的 pH 可能会继续下降,特别是里下河浅洼地土区。

3.2 土壤 pH 时空变化的驱动因素分析

3.2.1 施肥和田间管理

长期的不合理施肥,特别是施用硫酸铵、氯化钾、氯化铵等酸性和生理酸性肥料,可以造成土壤酸化^[15, 16]。如 Huang 等人在江苏南京和无锡的对比研究,表明大量地施用化学肥料可以导致菜园土壤的酸化^[17]。另根据李军等的研究^[18],江苏省化肥的不合理施用主要表现在化肥总施用量过大和氮、磷、钾比例失调,其中氮肥施用量占绝对优势。而江苏省的氮肥又以铵态氮肥为主, NH_4^+ 进入土壤后经过一系列的转化过程最终造成土壤 H^+ 增加,特别是在酸缓冲能力较弱的土壤上,会出现严重的酸化。沂沭岗地浅洼平原土区、徐淮黄泛平原土区、里下河浅洼地土区和沿江平原土区均以传统农业和种植业为主导产业,长期的过量施用氮肥,可能是造成这些地区土壤酸化的一个主要原因。此外,过去 20a 里江苏省农业机械化得到普及,大量的秸秆在作物收割过程中直接归还土壤^[19],在一定程度上可能会导致土壤酸碱性变化^[2],但是变化的趋势和程度还有待于进一步研究确认。

3.2.2 土地利用及种植类型变化

土地利用变化在一定程度上可以造成土壤酸碱性的变化,但并非所有的土地利用变化都会造成土壤酸化,当它伴随着不合理的种植方式和管理方式,才会造成严重的土壤酸化,也并非所有的酸化都是有害的。由于徐淮黄泛平原土区土壤原始 pH 较高、盐碱较重,过去的 20a 里有大面积的旱地或者林地改为水田种植水稻,旱地淹水种稻可以显著降低这些地区土壤的 pH^[20]。太湖平原土区和宁镇扬低山丘陵土区过去 20a 里,一方面由于城市化的快速发展占用大量农田,导致土壤酸碱性的强烈变化;另一方面由于人口膨胀,对蔬菜等农副产品的需求量增加,在城镇郊区还存在大量的水稻田改为菜地,水田改为菜地后由于不合理施肥、土地复种指数增加、土地利用率和土地投入量不断增加等,导致了较为严重土壤酸化^[5]。另外宁镇扬低山丘陵土区在过去的 20a 里也广泛存在旱改水,但是由于该地区原始 pH 较低(图 2a),旱改水后可能会导致土壤 pH 上升^[6]。由于太湖平原土区和宁镇扬低山丘陵土区土地利用的变化没有徐淮黄泛平原土区和苏北滨海平原土区的连续,而且城市化暂时只对其周边土壤的酸碱性造成严重影响,所以太湖平原土区和宁镇扬低山丘陵土区南部地区过去 20a 里,土壤酸碱性变化显得支离破碎,而且或升或降比较复杂。

3.2.3 工业化、城市化因素

江苏省特别是太湖平原土区、宁镇扬低山丘陵土区近 20a 来社会经济快速发展,城市化、工业化进程不断

加快,已经成为我国经济最发达的地区之一。工业迅猛发展导致的“三废”增加已经成为局部地区土壤急剧酸化的重要因素,如采矿、化工、电镀、纺织、印染、造纸等工业废水排入土壤,工业废气中的 SO_2 、 NO_x 等造成的酸性干湿沉降,固体废弃物中所含酸性物质通过大气扩散或降水淋滤后也直接进入土壤,这些都将直接引起土壤 pH 的下降。邵学新等在江苏省张家港市的研究发现企业周围土壤比大田土壤 pH 平均低 0.35 个 pH 单位,两者在 $p < 0.05$ 水平上差异显著^[7]。韩敏等调查发现,苏南和沿长江地区雨水酸度和酸雨频率较高^[21],而苏北地区酸雨发生较少^①,这也加速了太湖平原土区、宁镇扬低山丘陵土区土壤的酸化。

另外据刘坚等人的研究,1989~2003 年间江苏省耕地面积净减少 41.25hm^2 ,林地面积减少 7.87hm^2 ,而建设用地却持续增长^[22]。一方面,这种土地利用方式的改变直接导致各种土壤性质的恶化;另一方面,城市化过程中人为地向周围土壤输入酸、碱物质会导致土壤出现极端的酸碱反应,其变异范围在 3~12 之间^[23]。如排放的大量建筑废弃物、水泥、砖块和其它碱性混合物等进入周围土壤后向土壤中释放其所含的 Ca,混凝土风化也向土壤中释放 Ca,另外大量含碳酸盐的灰尘和沉降进入土壤,最终导致城市土壤趋向于碱性,与自然土壤差异明显^[24]。因此,近 20a 来随着苏南城市化过程中大量碱性物质的输入,导致局部地区土壤 pH 有所上升(图 3b)。

3 结论

虽然两个时期的江苏省土壤 pH 空间分布都呈基本相似的南酸北碱格局,但局部地区也存在较大的变化,主要表现为酸性土壤面积增大,有必要采取一定的酸化控制对策。

土壤 pH 的变化取决于外界致酸致碱因素和土壤本身抵制酸碱变化的能力,盐土和潮土的酸缓冲能力强于水稻土和地带性土壤。沂沭岗地浅洼平原土区、徐淮黄泛平原土区、里下河浅洼地土区和沿江平原土区主要受不合理施肥、田间管理和土地利用及种植类型变化的影响,同时沿江平原土区工业因素也不可忽视;太湖平原土区和宁镇扬低山丘陵土区的影响因素比较多,除以上因素外还包括工业化和城市化等。

不同的地区导致土壤酸碱性变化的主导因素各不相同,土壤类型不同酸碱缓冲性能也不同,因此土壤 pH 时空变化是一个及其复杂的问题。本文根据调查的结果和相关的文献推测了这些导致土壤 pH 时空变化因素,及不同因素对各地区影响的相对强弱。导致这些变化具体明确的原因,还有待于进一步地开展调查和试验研究。

Reference:

- [1] Xiong Y, Li Q K. The soil of China, the second edition. Beijing: Science Press, 1987. 433—463.
- [2] Xu R K, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5): 385—388.
- [3] Yu T R. The acidity characters and acidification of soil in China. *Chinese Journal of Soil Science*, 1988, 19(2): 49—51.
- [4] Qiu R L, Zhang Y N, Mo D L. Study on sensitivity of soil to acid deposition in south China I. Factors affecting acid sensitivity of soil and their mathematical treatment. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1997, 36(5): 78—83.
- [5] Zhou S L, Lu C F, Wan H Y. Study on the characteristic and cause of vegetable soil acidification in the area of southern Jiangsu Province. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, 2005, 33(1): 69—72.
- [6] Li Z P, Li D C, Zhang T L, *et al.* Dynamics of soil properties of paddy fields in red soil region. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 870—878.
- [7] Shao X X, Huang B, Gu Z, *et al.* Spatial-Temporal variation of pH values of soils in a rapid economic developing area in the Yangtze River Delta Region and their causing factors. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(2): 143—149.
- [8] Office of Soil Survey in Jiangsu Province. The Soil of Jiangsu Province. Beijing: China Agricultural Press, 1995. 1—589.
- [9] Committee of Chorography Compilation in Jiangsu Province. Chorography of Jiangsu Province Soil series. Nanjing: Jiangsu Ancient Books Press. 2001, 381—428.
- [10] National Soil Survey Office. Soil series of China. Vol. 1. Beijing: China Agricultural Press, 1993. 1—924.
- [11] Office of Soil Survey in Jiangsu Province. Soil series of Jiangsu Province. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996. 1—302.

① 江苏省环境状况公报 1997、1998、1999、2000、2001、2002、2003、2004、2005, <http://www.jshb.gov.cn/jshb/>

- [12] Zhao Y C, Shi X Z, Weindorf D C, *et al.* Map scale effects on soil organic carbon stock estimation in North China. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70 (4): 1377—1386.
- [13] Conyers M K, Uren N C, Helyar K R. Causes of changes in pH in acidic mineral soils. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 27: 1383—1392.
- [14] Chadwick O A, Chorover J. The chemistry of pedogenic thresholds. *Geoderma*, 2001, 100: 321—353.
- [15] Jaiyeoba I A. Changes in soil properties due to continuous cultivation in Nigerian semiarid Savannah. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70: 91—98.
- [16] Gudmundsson T, Björnsson H, Thorvaldsson G. Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland. *Catena*, 2004, 56: 213—224.
- [17] Huang B, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 112: 391—402.
- [18] Li J, Huang J F, Cheng J A. Time spatial distribution character of fertilizer consumption and potential pollution in China. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 145—149.
- [19] Zhu J, Huang B, Sun W X. Tempo-spatial variation of soil organic matter of farmland and its affecting factors in a typical area of the Yangtze River Delta Region. *Soil*, 2006, 38(2): 158—165.
- [20] Sun G Y. The primary study on soil fertility properties of steady high productive land in areas with dry farming changing to water culture in north of Huai River, Jiangsu Province, China. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 1993, 6: 40—42.
- [21] Han M, Wang T J, Xu R L. Present and future situation of air pollution and acid rain in Jiangsu Province. *Pollution Control Technology*, 2003, 16(2): 17—20.
- [22] Liu J, Huang X J, Zhai W X, *et al.* Tendency and driving mechanism of intensive land use change in the rapid urbanization area of Jiangsu Province. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2005, 23(2): 223—227.
- [23] Zhang G L, Zhu Y G, Fu B J. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environment impacts. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 539—546.
- [24] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. Characters and primary study on classification of urban soil in Nanjing, China. *Soil*, 2001, 33(1): 47—51.

参考文献:

- [1] 熊毅,李庆逵主编. 中国土壤(第二版). 北京: 科学出版社, 1987. 433~446.
- [2] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 385~388.
- [3] 于天仁. 中国土壤的酸度特点和酸化问题. *土壤通报*, 1988, 19(2): 49~51.
- [4] 仇荣亮, 张云霓, 莫大伦. 南方土壤酸沉降敏感性研究 I. 酸敏感性影响因子及其数学表征. *中山大学学报(自然科学版)*, 1997, 36(5): 78~83.
- [5] 周生路, 陆春峰, 万红友. 苏南菜地土壤酸化特点及成因分析. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(1): 69~72.
- [6] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征. *土壤学报*, 2003, 40(6): 870~878.
- [7] 邵学新, 黄标, 顾志权, 等. 长三角经济高速发展地区土壤 pH 时空变化及其影响因素. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(2): 143~149.
- [8] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995. 1~589.
- [9] 江苏省地方志编纂委员会. 江苏省志·土壤志. 南京: 江苏古籍出版社, 2001. 381~428.
- [10] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第一卷). 北京: 农业出版社, 1993. 1~924.
- [11] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土种志. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996. 1~302.
- [12] 李军, 黄敬峰, 程家安. 我国化肥施用量及其可能污染的时空分布特征. *生态环境*, 2003, 12(2): 145~149.
- [13] 朱静, 黄标, 孙维侠, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素. *土壤*, 2006, 38(2): 158~165.
- [14] 孙庚寅. 江苏淮北旱改水地区高产稳产农田土壤肥力特性的初步研究. *江苏农业科学*, 1993, 6: 40~42.
- [15] 韩敏, 王体健, 徐瑞林. 江苏省大气污染和酸雨的现状及预测. *污染防治技术*, 2003, 16(2): 17~20.
- [16] 刘坚, 黄贤金, 翟文侠, 等. 快速城市化背景下江苏省土地利用程度变化及其人文驱动因素分析. *四川农业大学学报*, 2005, 23(2): 223~227.
- [17] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应. *生态学报*, 2003, 23: 539~546.
- [18] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究. *土壤*, 2001, 33(1): 47~51.