

长江中下游粮食主产区 25 年来稻田土壤养分演变特征

李建军^{1,2}, 辛景树³, 张会民^{2*}, 段建军^{1*}, 任意³, 孙楠², 徐明岗²

(1 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与养分循环重点实验室, 北京 100081; 3 全国农技推广服务中心, 北京 100026)

摘要:【目的】目前我国的水稻产量约占粮食总产量的一半以上, 面积占耕地总面积的 30%, 为了探明我国水稻土壤养分和肥力的演变特征, 科学合理指导稻田土壤养分管理和施肥, 本文对长江中下游水稻主产区 20 世纪 80 年代以来国家水稻土长期动态监测数据进行了整理分析。【方法】利用时间趋势分析和中值分析的方法对长江中下游地区稻田土壤养分随时间的变化趋势进行了分析, 分别总结了土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)的含量以及土壤 pH 在不同监测时期的演变特征和总体变化趋势; 用统计分析得出不同监测时期施肥量的变化情况; 运用主成分分析的方法对上述 6 大肥力指标对该区土壤综合肥力属性的年代变化趋势所产生的作用和影响进行了分析, 得出不同监测时期土壤肥力主要贡献因子和限制性因子的变异情况。【结果】1) 我国长江中下游地区稻田土壤有机质、全氮和碱解氮含量与监测初期相比均略有升高, 其中有机质含量从监测中期到监测后期上升趋势明显 ($P < 0.05$), 碱解氮从监测初期到中期也呈显著性增加趋势 ($P < 0.05$); 2) 监测 25 年来, 土壤有效磷含量从 12.4 mg/kg 增加到 12.9 mg/kg, 土壤速效钾含量总体上呈稳中有升的变化趋势, 与监测初期相比, 监测中期和监测后期的速效钾含量分别增加了 13.9 mg/kg 和 17.9 mg/kg; 3) 土壤 pH 值总体呈缓慢降低的趋势, 下降了 0.37 个单位, 表明在当前的施肥和田间管理措施下我国水稻土存在一定的酸化趋势; 4) 土壤全氮、碱解氮与有机质含量变化存在显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 且变化趋势基本一致; 5) 与监测初期相比, 20~25 年后水稻土土壤肥力主要贡献因子由全氮、碱解氮和有机质转变为全氮、碱解氮和速效钾, 主要限制因素从有效磷和速效钾含量的缺乏转向 pH 值的逐渐降低。【结论】在农民习惯的耕作施肥管理条件下, 该地区稻田土壤养分含量基本呈上升趋势, 说明土壤肥力总体上得到了改善; 但土壤 pH 在一定程度上已显现出对土壤肥力的限制性作用, 所导致的酸化趋势需要关注。另外, 从农田养分平衡管理的角度看, 土壤速效钾和有效磷仍然是该区稻田持续生产和农业持续发展的重要影响因素, 在施肥过程中对钾与磷的投入仍需加强, 而氮肥施用量需要合理控制。

关键词: 常规施肥; 稻田; 土壤养分; 土壤肥力; 变化趋势

中图分类号: 158.3

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2015)01-0092-12

Evolution characteristics of soil nutrients in the main rice production regions, the middle-lower reach of Yangtze River of China

LI Jian-jun^{1,2}, XIN Jing-shu³, ZHANG Hui-min^{2*}, DUAN Jian-jun^{1*}, REN Yi³, SUN Nan², XU Ming-gang²

(1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization of the Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3 The Center of Extending and Service of Agricultural Technique in China, Beijing 100026, China)

Abstract: 【Objectives】In China, rice accounts for more than half of total grain production, and more than 30% of the total cultivated land. However, research of paddy soil nutrient evolution with large area scale on the national level has not been carried out, the evolution dynamic and process of soil fertility need to be investigated. In this

收稿日期: 2014-05-23

接收日期: 2014-09-07

基金项目: 国家“973”课题(2011CB100501); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203030)资助。

作者简介: 李建军(1987—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与作物生产研究。E-mail: lijyies@126.com

* 通信作者 E-mail: zhanghuimin@caas.cn; E-mail: djwxl@126.com

study a long-term, since 1980s multi-point monitoring experiments were set up for investigating the evolution characteristics of soil nutrients and fertility in the major rice production regions, the middle-lower reach of Yangtze River of China. **【Methods】**The temporal change and principal component analysis were carried out for the soil nutrients and the rational fertilization in the paddy fields. At first, the change of paddy soil nutrients over time in the area was analyzed using temporal change descriptive statistics analysis, and summarized results of the evolution characteristics and overall trend about soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), alkaline-hydrolyzable N (AN), available phosphorous (AP), available potassium (AK) content and soil pH in different monitoring periods. Secondly, the fertilization amount trend in different monitoring period was analyzed using statistical analysis. Finally, the role and influence of the six fertility indicators, at the temporal trend of integrated soil fertility properties were analyzed using the principal component analysis, and the results were provided with the variation of the main contribution factor and limiting factor of soil fertility in different monitoring periods. **【Results】** 1) Compared with the first monitoring stage, SOM, TN and AN slightly increased after 20–25 years, SOM significantly increased from middle monitoring stage to the later monitoring stage ($P < 0.05$), while AN also significantly increased from first monitoring stage to the middle monitoring stage ($P < 0.05$). 2) AP increased from 12.4 mg/kg to 12.9 mg/kg. Similarly, AK was increased by 13.9 mg/kg and 17.9 mg/kg respectively in the middle monitoring stage and later monitoring stage compared with the first monitoring stage. 3) In general soil pH was decreased by 0.37 units, which indicated that the famer's habitual fertilization model and field management led to soil acidification in the paddy field soils. 4) Three nutrient indexes (SOM, TN, and AN) were significantly positive correlations ($P < 0.01$), with a similar temporal change trends. 5) Compared with the first monitoring stage, 20–25 years later, the main contribution factors for soil fertility in these paddy fields were changed from TN, AN and SOM to TN, AN and AK. The main restricted factors for soil fertility were changed from the deficits of AP and AK to the declined pH value. **【Conclusions】**In general, the soil nutrients increased under famer's habitual fertilization model in the paddy fields, which indicated that soil fertility improved. However, it appeared that the soil acidification became the restrict factors for soil fertility. In addition, from the perspective of farmland nutrient balance management, soil available potassium and phosphorus are still the key influence factors of sustainable production and development of agriculture in paddy soil. Potassium and phosphorus fertilizer inputs needs to be strengthened in the fertilization process, and nitrogen fertilizer needs to be reasonable controlled.

Key words: conventional fertilization; paddy field; soil nutrients; soil fertility; change trend

水稻是我国最重要的粮食作物,长江中下游地区则是我国最重要的水稻种植和分布区。2010 年长江中下游地区水稻种植面积为 $1.49 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国水稻种植面积的 49.87%, 总产量 $9.85 \times 10^6 \text{ t}$, 占全国稻谷总产量的 50.33%^[1]。因此保持并不断提高我国包括长江中下游地区的水稻产量对我国粮食安全具有举足轻重的作用。然而水稻单产高低和水土土壤肥力状况很大程度上取决于土壤养分含量及其比例,监测、分析我国及长江中下游地区水稻土土壤养分状况及其演变特征对我国粮食生产和粮食安全以及水稻土科学管理都具有重要的现实意义。

目前关于土壤养分的研究和监测工作已有大量报道。如自全国第二次土壤普查以来,我国农田土壤氮、磷持续盈余且盈余量持续加大,钾欠缺逐年缓

和,有机质含量除东北地区外大部分地区呈上升趋势^[2-3]。我国耕地土壤在常规施肥管理水平下从 1985 ~ 1997 年有机质和氮、磷、钾含量不断提高;1998 ~ 2006 年间土壤肥力状况基本稳定,其中有效磷稳中有升,速效钾变化不大,不同区域土壤养分含量和 pH 值的变化趋势存在一定差异^[4]。张世熔等对 1980 和 2000 年河北省曲周县 124 个样点耕层土壤有效磷和速效钾含量的分析结果表明,2000 年该县土壤有效磷和速效钾平均含量为 8.8 mg/kg 和 90.0 mg/kg, 分别比 1980 年增加 69.2% 和降低 46.1%^[5]。

对水稻土土壤养分含量和动态研究也有不少报道,如我国南方水稻主产区 1987 ~ 2006 年土壤有机质平均含量由 28.6 g/kg 上升到 33.4 g/kg,增幅为 16.8%,随种植年限的增加土壤有机质略呈上升

趋势^[6]。刘畅等对不同施肥措施下亚热带稻田土壤有机碳、全氮的演变特征及其耦合关系进行了研究,结果表明,1986~2003年不施肥处理稻田的土壤有机碳和全氮含量略呈下降趋势;施化肥处理的土壤有机碳和全氮含量分别提高了13%和18%,土壤C/N为8.5~12.9^[7]。1990~2005年南方冲积性水稻土施氮、磷、钾化肥或氮磷钾化肥与有机肥配施处理的速效钾呈上升趋势^[8]。另外近期有研究表明,我国主要农田土壤酸化严重^[9],尤其是红壤酸化已经成为南方稻田作物生长的重要限制因子^[10-11]。长达20年的红壤耕地pH值定位观察试验也发现土壤pH值平均每10年下降0.8,其中江西兴国农田定位观察试验点的土壤pH值平均降幅达0.94个单位^[12-13]。

然而综合目前有关农田土壤养分和肥力演变的一系列研究不难发现,在国家层面和大区域尺度上对水稻土土壤养分和肥力的长期动态变化过程的分析和研究还比较缺乏,其演变特征尚不明确,尤其是有关土壤肥力演变过程中主要限制和贡献因子的研究还未见报道。因此,本研究整理并分析了农业部1988年以来长江中下游地区稻田土壤养分的监测数据资料,旨在揭示25年来在我国农民习惯施肥管理方式下,稻田土壤养分的长期变化趋势,并进一步分析稻田土壤肥力属性的年代差异,为稻田土壤肥力培育和制订更科学的施肥策略提供重要的参考依据。

1 材料与方法

长江中下游双季和单季稻区共有80个国家水稻土养分长期动态监测点,分布在江苏(8)、上海(3)、浙江(7)、安徽(15)、江西(8)、湖北(13)、湖南(26)等七省市(图1)。本区属亚热带湿润季风气候,

稻作生长季210~260 d, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温4500~6500 $^{\circ}\text{C}$,日照时数700~1500 h,稻作期降水量700~1600 mm。稻作土壤在平原地区多为新积土、潮土和沼泽土,在丘陵山地多为红壤、黄壤、黄棕壤和黄褐土。监测点绝大部分从1988年开始监测记录,期间又做部分调整,并新增加了一些监测点位,因此将80个监测点划分为监测初期(1988~1992年)、监测中期(1993~2007年)和监测后期(2008~2012年)3个时间段进行分析,以避免个别年份点位差异对土壤养分指标演变规律造成影响。另外,为减少个别年份年际间气候变异的影响,分别以前5年(1988~1992年)和后5年(2008~2012年)的养分含量中值表示监测初期和监测后期的养分状况。

监测项目每个监测点设对照(不施肥)和常规施肥(农民习惯施肥)两个处理。依照当地农民习惯进行施肥、轮作及水肥管理,并记录不同时期的施肥量、肥料种类、养分含量、作物类型等信息。每季水稻收获后采集耕层土壤(0—20 cm)样品,用常规分析方法^[14]测定有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾以及土壤pH值等土壤肥力指标。试验数据采用MS Excel 2007软件进行整理;运用Sigmaplot10.0和SPSS17.0进行相关分析及显著性检验;采用SAS软件结合周波等^[15]的方法作主成分分析。

另外,鉴于算术平均数容易受一组数据中极端数值(特大或特小)的影响,代表性较差,所以本研究中有关土壤养分和施肥量演变趋势的数据均以中值表示。不同监测时期土壤养分与施肥量中值之间采用Kruskal-Wallis H单向显著性检验($P < 0.05$);基本思想是,如果多个总体的中位数无显著

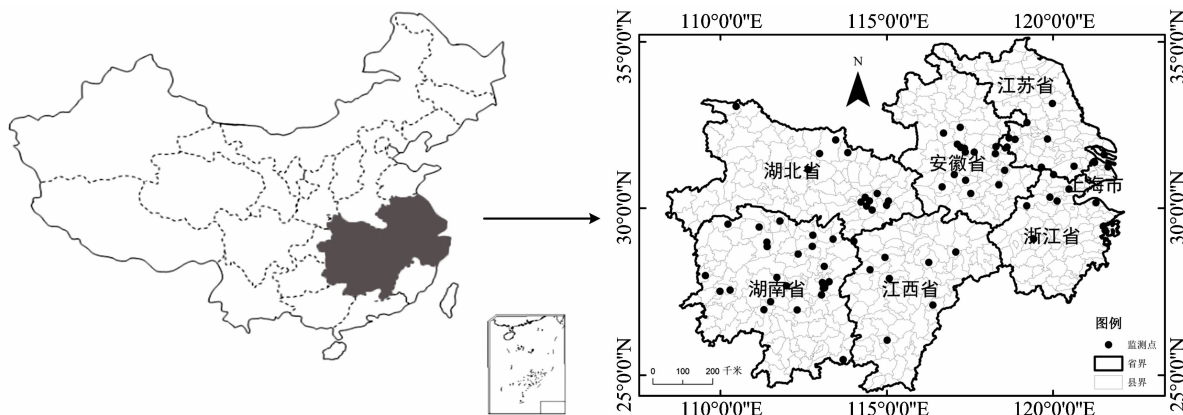


图1 长江中下游区国家水稻土长期动态监测点位置

Fig. 1 Map of the national long-term monitoring sites of paddy soil in the middle and lower reaches of Yangtze River

差异,或者说多个总体有共同的中位数,那么这个共同的中位数应在各样本组中均处在中间位置上,于是,每组样本中大于该中位数或小于该中位数的样本数目应大致相同。

2 结果与分析

2.1 土壤养分变化趋势

2.1.1 土壤有机质 纵观整个变化过程,长江中下游区稻田土壤有机质含量总体略呈上升趋势,经过

20~25 年间的演变,从监测初期的 29.4 g/kg 增加到监测后期的 30.8 g/kg(图 2);尤其从监测中期到后期,呈显著性上升趋势($P < 0.05$)。

2.1.2 土壤全氮 从总体变化情况来看,土壤全氮的变化趋势与土壤有机质相近,基本呈现上升趋势;从监测初期到监测中期土壤全氮含量由 1.7 g/kg 增加到 1.8 g/kg;而从监测中期到监测后期没有明显的增减变化,基本趋于稳定(图 3)。

2.1.3 土壤碱解氮 该区土壤碱解氮含量总体呈

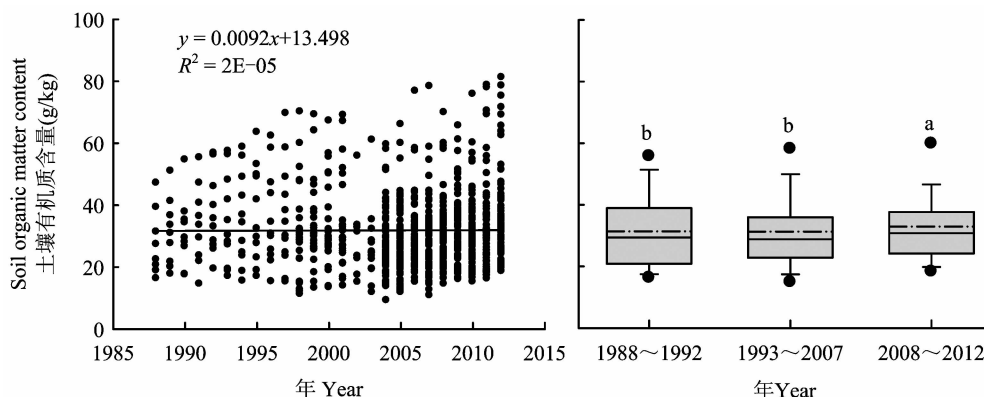


图 2 长江中下游区稻田土壤有机质含量变化趋势

Fig. 2 Trends of soil organic matter content in paddy soil in the Yangtze River region

[注(Notes): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的 25% 和 75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的 5% 和 95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

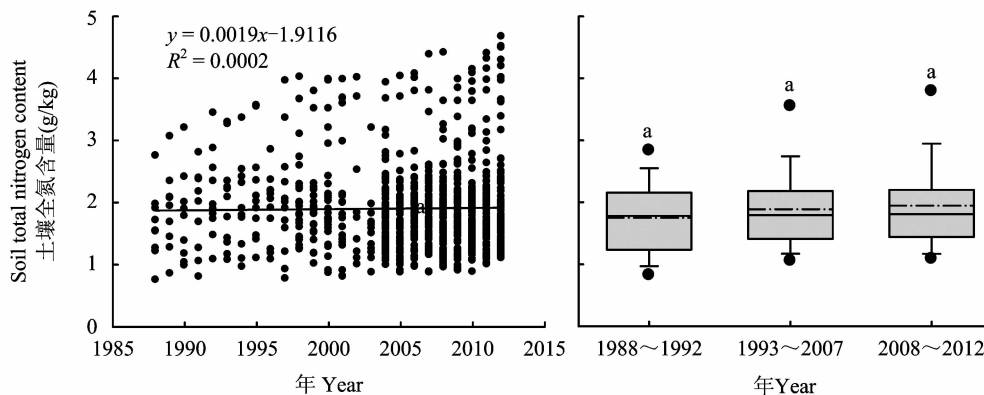


图 3 长江中下游区稻田土壤全氮含量变化趋势

Fig. 3 Trends of total nitrogen content in paddy soil of the Yangtze River region

[注(Notes): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的 25% 和 75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的 5% 和 95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

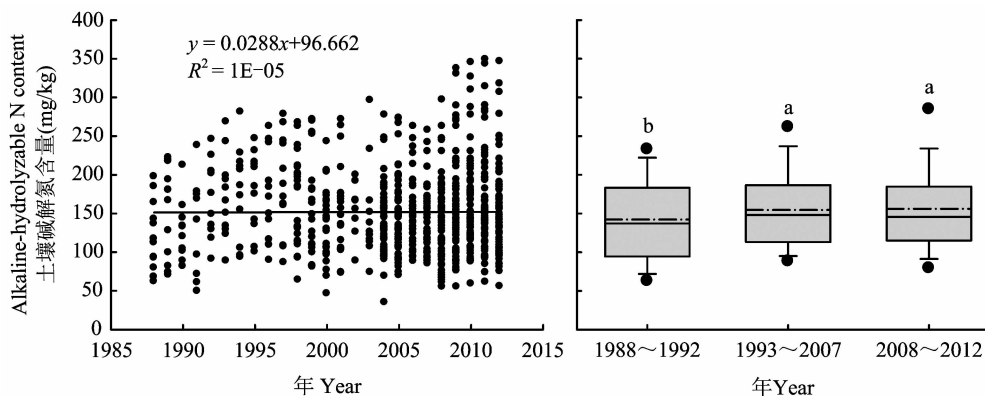


图4 长江中下游区稻田土壤碱解氮含量变化趋势

Fig. 4 Trends of alkaline-hydrolyzable N content in paddy soil in the Yangtze River region

[注(Note): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的25%和75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的5%和95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在5%水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

上升趋势;尤其从监测初期到监测中期,上升趋势明显($P < 0.05$),总体增加了11 mg/kg;而监测中期以后土壤碱解氮含量总体变化趋势相对平缓。

2.1.4 土壤有效磷 长江中下游地区稻田土壤有效磷含量总体呈上升趋势(图5);分析结果显示,监测

初期土壤有效磷含量为12.4 mg/kg,20~25年后总体含量增加到12.9 mg/kg,并且从监测初期到中期的增长幅度要大于从监测中期到后期的增长幅度。

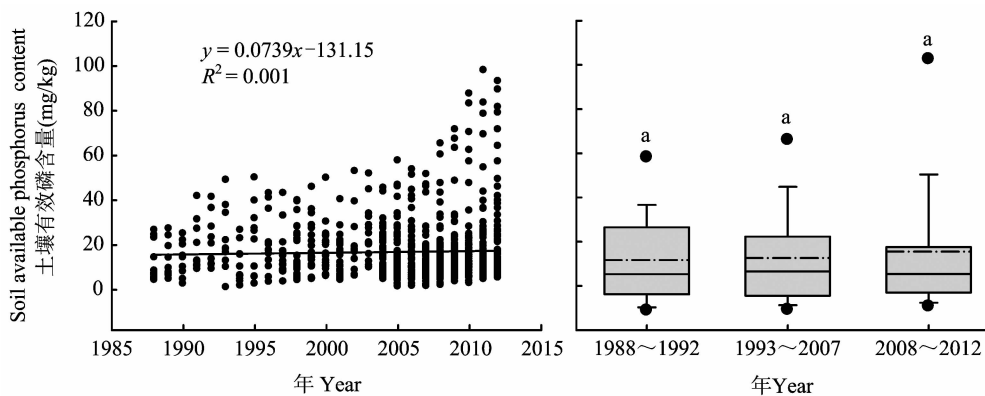


图5 长江中下游区稻田土壤有效磷含量变化趋势

Fig. 5 Trends of available phosphorous content in paddy soil in the Yangtze River region

[注(Note): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的25%和75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的5%和95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在5%水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

2.1.5 土壤速效钾 从图 6 可以明显看出,近 25 年来长江中下游地区稻田土壤速效钾含量的变化趋势表现为稳步上升。而对三个监测时期的变化情况进行差异性分析可得出,每个监测阶段之间都呈现出

显著性差异($P < 0.05$);其中,监测后期土壤速效钾含量为 74 mg/kg,与监测中期(70 mg/kg)和监测初期(56.1 mg/kg)相比,分别提高了 7.1% 和 31.9%。

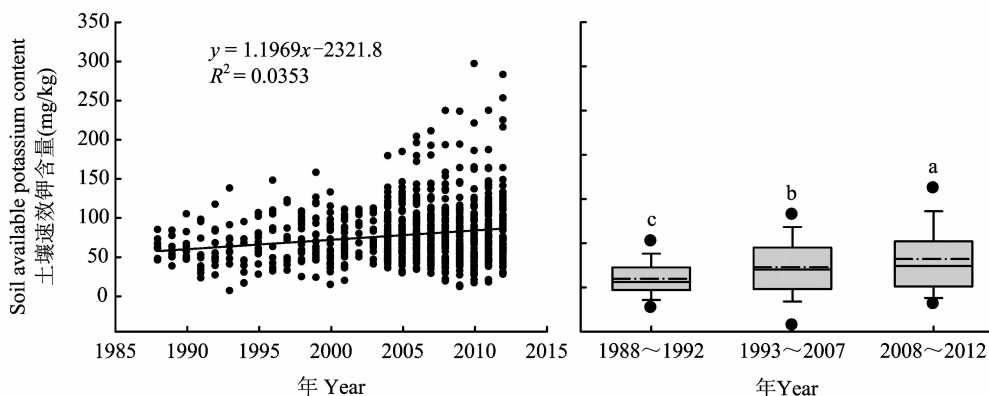


图 6 长江中下游区稻田土壤速效钾含量变化趋势

Fig. 6 Trends of available potassium content in paddy soil in the Yangtze River region

[注(Note): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的 25% 和 75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的 5% 和 95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

2.1.6 土壤 pH 值 由图 7 可知,长江中下游区稻田土壤 pH 值总体呈下降趋势,监测 25 年后下降了 0.37 个单位。尤其从监测初期(6.4)到监测中期

(6.0),土壤 pH 值下降显著($P < 0.05$)。

2.2 施肥用量的变化趋势

通过对长江中下游地区 25 年来农民习惯性管

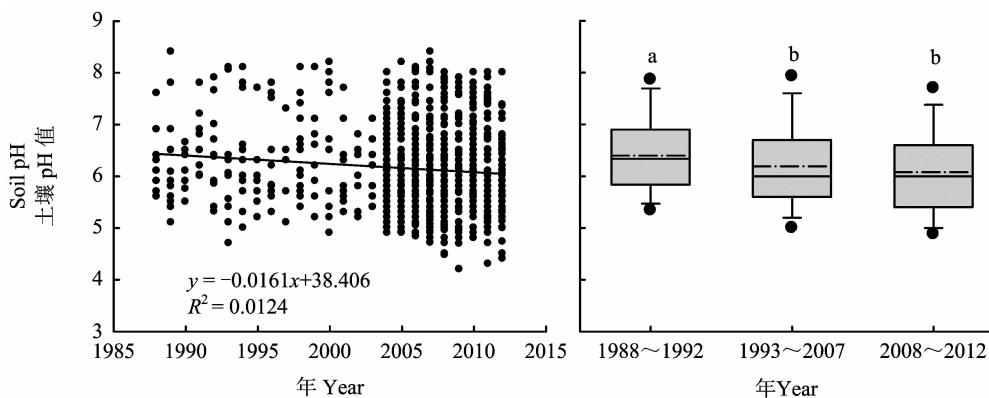


图 7 长江中下游区稻田土壤 pH 值的变化趋势

Fig. 7 Trends of pH in paddy soil in the Yangtze River region

[注(Note): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的 25% 和 75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的 5% 和 95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

理水平下肥料施用量(由于信息记录的原因,本文以数据相对完善的第一季作物施肥量的变化情况为例)的统计分析可以看出,肥料总施用量整体上随时间呈上升趋势,从监测初期的 194.9 kg/hm^2 增加到监测后期的 219.1 kg/hm^2 ,增加了 12.4% 。但每种肥料施用量(氮肥、磷肥、钾肥)的变化趋势却不尽相同(图8):氮肥的施用量总体呈上升趋势,由监测初期的 322.3 kg/hm^2 增加到监测后期的 324.3

kg/hm^2 ;磷肥用量从监测初期到监测中期总体上呈增加趋势,但到监测后期由于数据记录大量的缺失,具有的信息不能真实地反映农民的磷肥施用情况;而钾肥的施用量持续增加,并且在监测的每一阶段都呈现出显著性差异($P < 0.05$),由监测初期的 61.2 kg/hm^2 分别增加到中期的 108 kg/hm^2 和后期的 119.7 kg/hm^2 ,增加幅度分别为 76.5% 与 95.6% 。

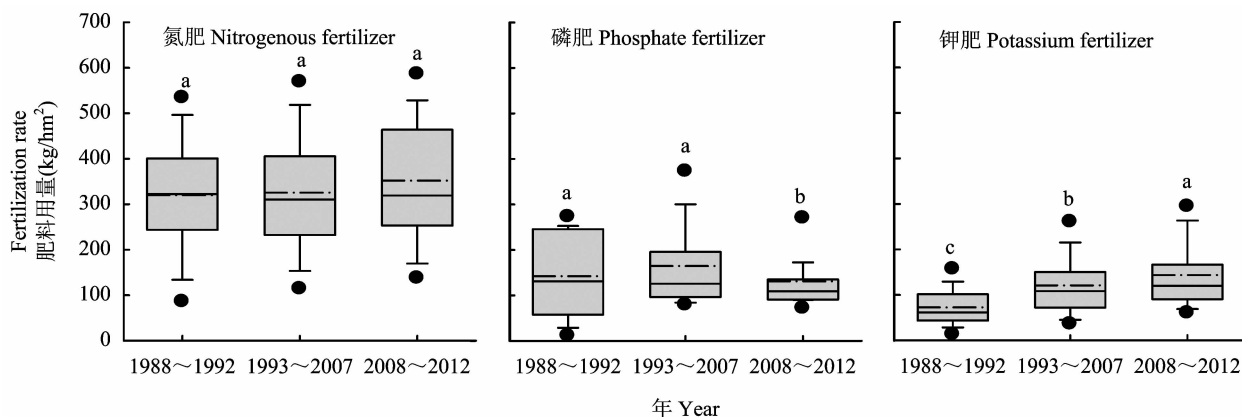


图8 长江中下游区稻田肥料施用量变化趋势

Fig. 8 Trends of fertilization rate in paddy soil in the Yangtze River region

[注(Note): 盒状图矩形盒中实线代表中值,虚线代表平均值,下四分位数(矩形盒下边缘)和上四分位数(矩形盒上边缘)分别代表全部数据的25%和75%,下边缘线和上边缘线分别代表全部数据的5%和95%,上下实心点代表异常值 The box rectangular box in the solid line represents the median whisker plot, the dotted line represents the mean, the lower quartile (rectangular box edges) and the upper quartile (the upper edge of the rectangular box) represent 25% of all data and 75%, the lower edge and the upper edge line of the line representing the 5% and 95% of all the data, the solid dots represent the vertical outliers. 不同字母表示不同监测时期在5%水平差异显著 Values followed by different letters are significantly different among the different monitoring stages at the 5% level.]

2.3 不同年代土壤肥力演变的主成分分析

从以上对长江中下游地区稻田土壤养分变化趋势的分析可以看出,从1988年到2012年间,土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷以及速效钾的含量均呈上升趋势,土壤pH值呈下降趋势;但不同阶段的变化幅度和差异不尽相同,因此,不同肥力指标随时间的变化趋势存在较大的差异。由于单个土壤肥力指标的分析不能很好地反映土壤综合肥力属性的年代变化规律,故运用主成分分析的方法对土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、pH值6个肥力指标进行了分析,并分析了其对土壤综合肥力属性的年代变化趋势所产生的作用和影响。

2.3.1 土壤养分各指标的相关系数矩阵 运用相关系数公式,计算该区各土壤养分指标之间的相关系数矩阵(表1)。可以看出,从1988年到2012年间,

长江中下游粮食主产区稻田土壤全氮、碱解氮与有机质含量存在显著的正相关关系。

2.3.2 主成分贡献率 根据统计学累计贡献率 $\geq 85\%$ 来提取主成分的原则,本研究分别从监测初期(1988~1992)和后期(2008~2012)同时提取了3个主成分。监测初期统计结果表明,第1、2、3主成分对于总方差的贡献率分别为52.8%、20.7%、17.0%,三者之和达到90.4%,即前三个主成分能够把土壤全部指标所提供信息的90.4%反映出来(表2)。同样,由监测后期的统计结果(表3)也可以看出,前3个主成分的累计贡献率达到86.5%,即能够把土壤全部指标所提供信息的86.5%反映出来。因此,利用主成分分析长江中下游地区稻田土壤肥力属性的变异情况是可靠的。

表 1 各土壤养分指标的相关系数

Table 1 Correlation coefficient table for each soil nutrient indicators

项目 Item	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total N	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Available K
pH	1.000					
有机质 Organic matter	0.125	1.000				
全氮 Total N	0.184	0.946 **	1.000			
碱解氮 Alkaline N	-0.158	0.866 **	0.913 **	1.000		
有效磷 Available P	-0.176	-0.415 *	-0.416 *	-0.227	1.000	
速效钾 Available K	-0.029	-0.471 *	-0.364	-0.268	-0.158	1.000

注(Note): * — $P < 0.05$; * * — $P < 0.01$

表 2 监测初期(1988 ~ 1992 年)主成分分析表

Table 2 Principal component analysis in the first monitoring stage (1988 -1992)

主成分 Principal componen	相关矩阵的特征值 Eigenvalues of correlation matrix			提取因子载荷的平方和 Sum of the squares of the other factor loading		
	各主成分	各成分方差占	累计百分比	各因子	贡献率	累计贡献率
	特征值	总方差的比例(%)	CP	特征值	CR	CCR
	EV	PTVEV	(%)	CVEF	(%)	(%)
1	3.17	52.75	52.75	3.17	52.75	52.75
2	1.24	20.67	73.42	1.24	20.67	73.42
3	1.02	16.95	90.37	1.02	16.95	90.37
4	0.52	8.66	99.03			
5	0.05	0.83	99.86			
6	0.01	0.14	100.00			

注(Note): EV—Eigenvalues; PTVEV—Proportion of the total variance explained variance; CP—Cumulative percentages; CVEF—Characteristic value of each factor; CR—Contribution ratio; CCR—Cumulative contribution rate.

表 3 监测后期(2008 ~ 2012 年)主成分分析

Table 3 Principal component analysis in the later monitoring stage (2008 -2012)

主成分 Principal componen	相关矩阵的特征值 Eigenvalues of correlation matrix			提取因子载荷的平方和 Sum of the squares of the other factor loading		
	各主成分	各成分方差占	累计百分比	各因子	贡献率	累计贡献率
	特征值	总方差的比例(%)	CP	特征值	CR	CCR
	EV	PTVEV	(%)	CVEF	(%)	(%)
1	2.79	46.44	46.44	2.79	46.44	46.44
2	1.46	24.25	70.69	1.46	24.25	70.69
3	0.95	15.85	86.54	0.95	15.85	86.54
4	0.52	8.61	95.15			
5	0.22	3.74	98.89			
6	0.07	1.11	100.00			

注(Note): EV—Eigenvalues; PTVEV—Proportion of the total variance explained variance; CP—Cumulative percentages; CVEF—Characteristic value of each factor; CR—Contribution ratio; CCR—Cumulative contribution rate.

2.3.3 特征值和特征向量的计算 表4、表5分别为监测初期和后期所对应的初始因子载荷矩阵,每一个载荷量所表示的就是主成分与对应变量的相关系数。而 A1、A2、A3 分别为所提取的主成分中每个养分指标所对应的特征向量。

2.3.4 主要肥力因素分析 提取的主成分是原来各个指标的线性组合,各指标的权数为特征向量;它所表示的是各个单项指标对于主成分的重要程度并决定了该主成分的实际意义。因此,各肥力指标在主成分中的综合得分,即各肥力指标在3个主成分中所对应的载荷系数、特征向量(表4、表5)与该主成

分的贡献率(表2、表3)的乘积加和(表6)。由计算结果分析可以得出,监测初期该区土壤肥力的主要决定因素是全氮、碱解氮和有机质,主要障碍因素是土壤有效磷、速效钾含量的缺乏。20~25年后土壤肥力变化偏向于有效磷和速效钾含量提高,pH有所降低;土壤肥力的主要决定因素是土壤全氮、碱解氮和速效钾,主要限制因素可能为较低的pH值。因此,可以看出,从监测初期到监测后期,土壤肥力的主要决定指标和限制性因素发生了较大的变化。并且通过对土壤综合肥力的判别分析发现,两个年代的土壤综合肥力存在一定差异。

表4 监测初期(1988~1992年)初始因子载荷矩阵及特征向量
Table 4 Initial factor loading matrix and feature vectors of the first monitoring stage (1988-1992)

肥力指标 Fertility index	主成分 Principal component			特征向量 Feature vector		
	1	2	3	A1	A2	A3
pH	0.065	0.556	0.736	0.14	0.42	0.48
有机质 Organic matter	0.552	-0.014	0.032	0.67	-0.11	0.16
全氮 Total N	0.552	0.052	0.002	0.74	0.23	0.04
碱解氮 Alkaline N	0.507	-0.175	-0.270	0.99	-0.58	-0.72
有效磷 Available P	-0.251	-0.638	0.285	-2.24	-3.57	2.39
速效钾 Available K	-0.258	0.499	-0.550	-5.60	7.79	-8.18

表5 监测后期(2008~2012年)初始因子载荷矩阵及特征向量
Table 5 Initial factor loading matrix and feature vectors of the later monitoring stage (2008-2012)

肥力指标 Fertility index	主成分 Principal component			特征向量 Feature vector		
	1	2	3	A1	A2	A3
pH	-0.094	0.379	0.878	-0.18	0.37	0.56
有机质 Organic matter	0.573	0.036	0.085	0.63	0.16	0.24
全氮 Total N	0.571	0.106	0.095	0.78	0.33	0.32
碱解氮 Alkaline N	0.538	0.085	-0.011	1.02	0.40	-0.14
有效磷 Available P	0.067	0.645	-0.455	0.55	1.70	-1.42
速效钾 Available K	-0.207	0.649	-0.079	-1.76	3.12	-1.09

表6 各肥力指标综合得分值
Table 6 General scores of soil fertility indexes

年份 Year	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total N	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Available K
1988~1992	0.114	0.196	0.218	0.211	-0.662	-0.714
2008~2012	0.104	0.170	0.217	0.261	0.176	0.305

3 讨论与结论

土壤养分盈亏是导致农田土壤肥力时空变化的主要因素^[16],而研究表明导致土壤养分盈亏变化的主要原因之一就是施肥量和施肥种类的变化^[17]。施肥量的增减和施肥种类的不断变化而导致的农田养分平衡尤其是氮、磷、钾养分平衡的波动是农田土壤肥力演变的主要影响因素。

综合 25 年来长江中下游地区稻田土壤养分变化趋势,可以看出,该区稻田土壤肥力总体得到了改善,除土壤 pH 值外,土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷以及速效钾含量基本呈现上升趋势,与陈斌等^[18]的观测分析结果一致。土壤有机质的稳定水平取决于农田有机碳投入和输出之间的平衡^[19]。马俊永等^[20]研究表明,除增施秸秆外,单施化肥也能提高土壤有机质含量,而化肥配施秸秆更有利于土壤有机质的积累。长期定位试验研究发现,秸秆还田及有机肥配施氮、磷、钾化肥,还能提高土壤耕层有效磷和速效钾的含量^[21-22]。然而化肥尤其是化学氮肥的大量施用可导致农田氮素大量盈余,1995 年我国南方的浙江、福建、江西、湖南、广东和广西 6 省区农田氮素盈余量分别占输入量的 52%、185%、76%、104%、185% 和 70%^[23]。沈善敏等研究指出,长期施磷肥或有机肥能显著扩大土壤有效磷库,其中 23 年不施肥黑土全磷和有效磷含量分别下降了 37.4% 和 60.0%,而施用磷肥则土壤全磷含量增加了 53.9%~65.7%,有效磷增加了 6~15 倍^[24-25]。可见,长期施肥对土壤养分有重要影响,施肥量的增减和施肥种类的变化直接影响土壤养分的演变趋势。

长江中下游地区水稻土监测点的数据显示,监测初期到监测后期肥料的总施用量从 194.9 kg/hm^2 增加到 219.1 kg/hm^2 ,增加了 12.4%,农用氮肥和钾肥分别增加了 0.6% 和 95.6%,磷肥用量从监测初期到监测中期也呈现增加趋势。而《中国农业年鉴》的统计结果为,该区监测前期农用氮肥施用量为 $510.1 \times 10^4 \sim 566.5 \times 10^4 \text{ t}$,磷肥施用量为 $141.9 \times 10^4 \sim 164.9 \times 10^4 \text{ t}$,钾肥施用量为 $40.7 \times 10^4 \sim 69.9 \times 10^4 \text{ t}$,复合肥施用量为 $60.3 \times 10^4 \sim 124.3 \times 10^4 \text{ t}$ 。随着人们对施肥的日益重视,该区肥料施用量,尤其是化肥施用量不断增加,到监测后期,农用氮肥、磷肥、钾肥和复合肥的施用量分别上升到 $652.8 \times 10^4 \sim 662.2 \times 10^4 \text{ t}$, $210.2 \times 10^4 \sim 212.8 \times$

10^4 t , $144.4 \times 10^4 \sim 154.6 \times 10^4$ 和 $401.5 \times 10^4 \sim 485.5 \times 10^4 \text{ t}$ ^[1]。与监测初期相比,农用氮肥、磷肥、钾肥和复合肥大约每公顷分别增加了 0.10 t, 0.04 t, 0.07 t, 0.24 t^[1],与该区水稻土监测点的施肥用量的变化趋势相一致,因此导致土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷以及速效钾含量基本上都保持上升趋势。另外,注重秸秆还田,推行浅耕和免耕的耕作方式也会在一定程度上增加有机质等养分的积累^[26-27]。

长江中下游地区稻田土壤 pH 值总体呈逐渐下降趋势,从 1988 年到 2012 年总体下降了 0.37 个单位。长期不合理施用化学肥料可导致土壤酸化,尤其是化学氮肥对土壤酸化的影响比酸沉降大 25 倍^[28-29];如果连续施用 10~20 年,一些农田的耕层土壤 pH 值下降幅度可超过 1.0 个单位,且随施氮量的增加而明显增加^[30]。该区氮肥施用量 20~25 年来每公顷增加了 0.10 t ^[1],是该区 pH 值下降的主要原因。

主要肥力贡献因子和限制因子的变化与化肥投入量的持续增加有关,随氮肥用量的增加,磷、钾肥用量也在逐年增加,与监测初期相比,20~25 年后磷肥和钾肥的施用量分别增加了 $(58.1 \pm 10.2) \times 10^4 \text{ t}$ 和 $(94.2 \pm 9.5) \times 10^4 \text{ t}$,增幅为 37.9% 和 170.3%^[1]。土壤肥力的主要贡献因子从全氮、碱解氮和有机质转变为土壤全氮、碱解氮和速效钾,主要限制因素从有效磷和速效钾含量的缺乏转向 pH 值的逐渐降低,这表明从农田养分平衡管理的角度来看,土壤速效钾和有效磷仍然是该区稻田持续生产和农业持续发展的重要影响因素,在施肥过程中对钾与磷的投入和补充仍需加强,而氮肥施用量需要合理控制。另外,农田养分含量与作物产量之间的关系密切,尤其是大区域间农田基础地力的演变与土壤综合肥力的时空变异存在着深远的联系,但二者之间又有着显著的区别。以后的研究有待结合产量等数据进一步深入分析稻田土壤肥力及基础地力的时空演变特征,以便更加全面地了解农田地力的演变规律。

致谢: 本文的完成得到了全国农技推广服务中心和中国农业科学农业资源与农业区划研究所各位专家老师的关心和帮助,在此表示衷心地感谢! 同时感谢沈浦、蔡岸东、岳龙凯、何亚婷在文章修改过程中给予的建议和协助。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1980–2011.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. China Agriculture Yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1980–2011.
- [2] 沈善敏. 中国土壤肥力 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
Shen S M. Soil fertility of China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [3] Shen R P, Sun B, Zhao Q G. Spatial and temporal variability of N, P and K balances for agro-ecosystems in China [J]. *Pedosphere*, 2005, 15(3): 347–355.
- [4] 任意, 张淑香, 穆兰, 等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势 [J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 13–17.
Ren Y, Zhang S X, Mu L *et al.* Change and difference of soil nutrients for various regions in China [J]. *Soils and Fertilizer Sciences in China*, 2009, (6): 13–17.
- [5] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤速效磷, 钾的时空变异特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 3–8.
Zhang S R, Huang Y F, Li B G *et al.* Temporal spatial variability of soil available phosphorus and potassium in the alluvial region of the Huang Huai Hai Plain [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 3–8.
- [6] 全国农业技术推广中心、中国农业科学院农业资源与区划所. 耕地质量演变趋势研究 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
The National Agro-Tech Extension and Service Center(NATESC)/Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS. Study on the evolution trend of cultivated land quality [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2008.
- [7] 刘畅, 唐国勇, 童成立, 等. 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1489–1493.
Liu C, Tang G Y, Tong C L *et al.* Evolvement characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in subtropical paddy filed ecosystem under different fertilization practices [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1489–1493.
- [8] 张会民, 徐明岗, 陈义, 等. 长期施肥土壤钾素演变 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
Zhang H M, Xu M G, Chen Y *et al.* Evolution of potassium in soils of China under long term fertilization [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [10] 刘付程, 史学正, 于东升. 近 20 年来太湖流域典型地区土壤酸度的时空变异特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(6): 740–744.
Liu F C, Shi X Z, Yu D S. Spatial and temporal variability of soil acidity in the typical area of Taihu basin in recent 20 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(6): 740–744.
- [11] 程先富, 陈梦春, 郝李霞, 等. 红壤丘陵区农田土壤酸化的时空变化研究 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1348–1351.
Cheng X F, Chen M C, Hao L X *et al.* Spatio-temporal variation of soil acidification in hilly red soil croplands [J]. *Chinese Journal of Ecoagriculture*, 2008, 16(6): 1348–1351.
- [12] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治 [J]. 土壤, 2013, 45(4): 577–584.
Wu D M, Fu Y Q, Yu Z W *et al.* Status of red soil acidification and aluminum toxicity in South China and prevention [J]. *Soils*, 2013, 45(4): 577–584.
- [13] Huang S, Zhang W, Yu X *et al.* Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an Ultisol of southern China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138(1): 44–50.
- [14] 鲍士旦. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Bao S D. The analysis method of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] 周波, 陈旭飞, 张聪俐, 等. 深圳市光明新区土壤肥力时空演变的主成分分析 [J]. 华南农业大学学报, 2012, 33(4): 448–452.
Zhou B, Chen X F, Zhang C L *et al.* Principal component analysis of spatial and temporal evolution of soil fertility in Guangming new district, Shenzhen City [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33(4): 448–452.
- [16] 孙波, 潘贤章, 王德建, 等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1201–1208.
Sun B, Pan X Z, Wang D J *et al.* Influence of farmland nutrient balance on spatial and temporal change of soil fertility in different regions of China [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(11): 1201–1208.
- [17] Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China [J]. *Geoderma*, 2003, 115(1): 85–99.
- [18] 陈斌, 季应明, 吉训凤, 等. 江苏省海安县耕地土壤肥力定位调查与分析 [J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 72–75.
Chen B, Ji Y M, Ji X F *et al.* Investigation and analysis on soil fertility of cultivated land in Haian County of Jiangsu Province [J]. *Chinese Journal of Ecoagriculture*, 2005, 13(3): 72–75.
- [19] 路鹏, 苏以荣, 牛铮, 等. 红壤丘陵区村级农田土壤养分的空间变异与制图 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2007, 33(1): 89–95.
Lu P, Su Y R, Niu Z *et al.* Mapping and spatial variability of soil nutrients in farmland of red soil hilly region village [J].

- Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science Edition), 2007, 33(1): 89-95.
- [20] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 236-241.
- Ma J Y, Li K J, Cao C Y *et al.* Organic-inorganic fertilizer long-term fertilization effects on soil fertility and crop yield [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 236-241.
- [21] 张会民, 吕家珑, 李菊梅, 等. 长期定位施肥条件下土壤钾素化学研究进展 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35(1): 155-160.
- Zhang H M, Lü J L, Li J M, *et al.* Long-term research progress on chemical soil potassium fertilization under the conditions of pigment [J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2007, 35 (1): 155-160.
- [22] 胡诚, 宋家咏, 李晶, 等. 长期定位施肥土壤有效磷与速效钾的剖面分布及对作物产量的影响 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 673-676.
- Hu C, Song J Y, Li J *et al.* Profile distribution of long-term fertilization of soil available phosphorus and available potassium and the effect on crop yield [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 21(4): 673-676.
- [23] 鲁如坤, 时正元, 施建平, 等. 我国南方 6 省农田养分平衡现状评价和动态变化研究 [J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67.
- Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in Southern China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 63-67.
- [24] 沈善敏. 国外的长期肥料试验 (一) [J]. 土壤通报, 1984, 15(2): 85-91.
- Shen S M. Long term fertilizer experiment abroad (1) [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1984, 15(2): 85-91.
- [25] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 143-147.
- Zhou B K, Zhang X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability [J]. Plant nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(2): 143-147.
- [26] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响 [J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 209-213.
- Jiang Y H, Ning Z R, Ma Y L. The effect of straw returning on farmland ecosystem and crop growth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(5): 209-213.
- [27] 高明, 张磊, 魏朝富, 等. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 343-348.
- Gao M, Zhang L, Wei C F *et al.* Study on the changes of the rice yield and soil fertility in the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(4): 343-348.
- [28] 张永春, 汪吉东, 沈明星, 等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响 [J]. 土壤学报, 2010 (3): 465-472.
- Zhang Y C, Wang J D, Shen M X *et al.* Effects of long-term fertilization on soil acidification in Taihu Lake region, China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010 (3): 465-472.
- [29] Barak P, Jobe B O, Krueger A R *et al.* Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin [J]. Plant and Soil, 1997, 197(1): 61-69.
- [30] Schroder J L, Zhang H, Girma K *et al.* Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(3): 957-964.