

# 太湖竺山湾小流域果园养分投入特征及其土壤肥力状况分析

程 谊, 贾云生, 汪 玉, 赵 旭, 杨林章, 王慎强\*

(中国科学院南京土壤研究所 土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

**摘要:**以太湖竺山湾周边 5 个镇为研究区域, 采取资料调研与实地调查相结合的方法分析果园养分投入特征, 并采集典型果园土壤样本评价土壤肥力状况。结果表明, 太湖流域果园总体氮、磷、钾平均投入量分别为 N 522、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 674、K<sub>2</sub>O 462 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中来自于有机肥的比例分别为 51.3%、58.3%和 44.0%。化学肥主要为氮、磷、钾三元复合肥, 有机肥以鸡粪和牛粪为主。土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量均处于适宜至很丰富水平, 土壤速效磷和速效钾基本上处于较丰富状态, 氮、磷、钾养分平均盈余量分别为 N 320、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 426、K<sub>2</sub>O 108 kg·hm<sup>-2</sup>。太湖流域果园氮、磷的高投入不可避免地加大了氮、磷向水体迁移的风险, 因而亟待研发有效的果园节氮控磷技术。

**关键词:**太湖流域; 果园; 氮、磷、钾投入; 有机肥; 养分盈余

中图分类号: X158 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)10-1940-08 doi:10.11654/jaes.2014.10.010

## Nutrient Inputs and Soil Fertility Status in Orchards of Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

CHENG Yi, JIA Yun-sheng, WANG Yu, ZHAO Xu, YANG Lin-zhang, WANG Shen-qiang\*

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Planting around the Taihu Lake contributes greatly to its water pollution. In this research, both literature and questionnaire surveys (farmer interview) were used to analyze nutrient inputs to orchards, and typical soil samples were collected to evaluate soil fertility status in the surrounding five towns in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed. Results showed that average rates of total N, P and K inputs were N 522, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 674 and K<sub>2</sub>O 462 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, in orchards in Taihu Lake Watershed. Of which, organic fertilizer inputs accounted for 51.3%, 58.3% and 44.0% of total N, P and K application, respectively. Chemical fertilizer was mainly NPK compound fertilizer, while organic fertilizer was chicken and cattle manure. Soil organic matter, total N, P and K content ranged from appropriate to very rich. Available P and K contents were generally at a rich level. The average surplus of N, P and K were as high as N 320, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 42 and K<sub>2</sub>O 108 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively. High inputs of N and P to soils inevitably increased the risk of N and P migration into water. It is necessary to develop effective techniques to control N and P inputs while maintaining fruit production in orchard in Taihu Lake Watershed.

**Keywords:** Taihu Lake Watershed; orchard; N, P and K application; organic fertilizer; nutrient surplus

近年来, 太湖水污染尤其是富营养化日趋加剧, 夏季蓝藻水华频发, 其根本原因是水体总氮和总磷浓度严重超标<sup>[1]</sup>。“十一五”国家水专项课题对太湖流域污染负荷来源的分析表明, 总氮和总磷在农村面源

污染所占的比重分别约为 58%和 40%, 远远超过来自工业和城市生活的点源污染, 而作为农村面源污染三大来源之一的种植业污染对太湖总氮和总磷的贡献率分别为 29%和 19%<sup>[1-2]</sup>。集约化、高投入、高产出现是目前太湖地区种植业的主要特点。过量的施用化肥不仅会降低肥料利用率, 还会导致盈余的氮、磷养分通过径流、渗漏等途径进入水体, 加大了水体富营养化的风险<sup>[3]</sup>。太湖流域种植业主要以稻麦轮作为主, 一年稻麦两季作物化学氮肥和磷肥投入量分别高达 N 600、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[4-6]</sup>, 经过径流、渗漏进入水体的

收稿日期: 2014-03-10

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2012BAD15B03); 国家水专项课题 (2012ZX07101-004); 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX(14)2050]; 国家“948”项目 (2011-G30)

作者简介: 程 谊 (1983—), 男, 安徽绩溪人, 博士, 助理研究员, 从事土壤氮素循环及其农学与环境效应、农业面源污染控制研究。E-mail: ycheng@issas.ac.cn

\* 通信作者: 王慎强 E-mail: sqwang@issas.ac.cn

总氮占总施氮量的比例高达 22%<sup>[7]</sup>。近些年来,由于蔬菜和水果作物经济效益高,太湖流域稻改菜、稻改果现象突出。稻田改种蔬菜后,施肥量大增,尤其是氮投入量高达  $N\ 1400\ kg\cdot hm^{-2}$ ,肥料利用率反而降低,氮、磷的流失潜力加大<sup>[8]</sup>。然而,目前还不清楚太湖流域集约化果园的养分投入特征和养分平衡状况。为此,本研究拟通过资料调研与实地调查相结合的方法,于 2013 年在太湖竺山湾小流域开展了比较详细的果园养分投入和盈余情况调查。首先摸清果园肥料投入类型和投入量,分析果园土壤肥力状况,综合评价果园对太湖水体面源污染的潜力,为建立合理的果园氮、磷减排措施提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查和采样

太湖流域属湿润的北亚热带气候区。流域多年平均气温  $15\sim 17\ ^\circ C$ ,自北向南递增。多年平均降雨量为  $1177\ mm$ ,其中 60%的降雨集中在 5—9 月。降雨量年际变化较大,最大与最小年降水量的比值为 2.4;而年径流量年际变化更大,最大与最小年径流量的比值为 12.8。调查区域选在太湖竺山湾的上游汇水区域,因竺山湾形似口袋,面向北偏西,在特定的水动力作用下,污染物易进不易出,是太湖水质恶化和生态功能退化最快的湖区之一<sup>[9]</sup>。调查涉及无锡宜兴市和常州武进区,覆盖周铁镇、万石镇、和桥镇、前黄镇、雪堰镇。前期的资料调研表明,调查区内的果园主要为桃、葡萄和梨园,且种植面积逐年增加(图 1)。按调查区域果园总面积和果树种类确定调查点数量及分布。在采样前,根据果树种类和行政单元将采样区域分为若干个采样单元,集中在每个采样单元相对中心位置的典型地块采样,采用 GPS 定位。本次选择具有代表性的 242 个果园进行调查,其中桃园 160 个,葡萄园 60 个,梨园 22 个。

按照随机、等量和多点混合的原则,采用“S”形采样法,在树冠滴水线附近,避开施肥区域,每个果园随机选取样树 5 颗,均匀取 0~20 cm 土层的土壤约 500 g,混匀后作为该样点的土壤样品。照此方法,共采集研究区内桃园、葡萄园和梨园土样分别为 166、32、20 个。各样点土壤混合均匀后装入塑料袋中登记编号,带回实验室自然风干用于理化性质分析测定。

### 1.2 调查项目和方法

调查主要包括建园的基本情况、树龄、品种、种植面积、种植年限、种植密度及产量水平,肥料种类、肥

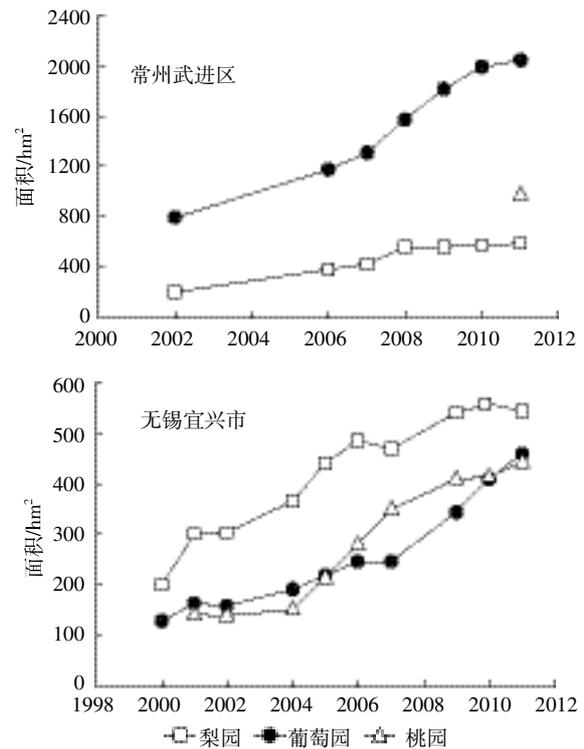


图 1 研究区内不同类型果园种植面积变化

Figure 1 Changes in cultivated area of three different orchards in studied region

料养分含量、肥料施用量、施肥时间、施肥类型、施肥方式、施用量等。养分平衡按下式计算:

养分平衡=输入项(化肥养分+有机肥养分+大气沉降养分)-输出项(作物收获带走量)

化肥养分含量按照农户所施肥料包装袋上标识的养分含量计算,有机肥料的养分含量根据《中国有机肥料养分志》<sup>[10]</sup>和《中国有机肥料资源》<sup>[11]</sup>的参数汇总计算。养分投入未考虑灌溉水带入的养分。化肥和有机肥输入的养分按照农户调查点的施用量与其相应含养分量计算;沉降氮计算根据本课题组在宜兴基地多年实测的大气氮素混合沉降平均值( $30.5\ kg\ N\ hm^{-2}$ )进行计算<sup>[7]</sup>。养分支出未包括因淋洗、氨挥发和反硝化造成的养分损失。不同果树产量、面积按照农户调查值和统计年鉴参考数据计算;不同果树吸收养分量按照《肥料实用手册》<sup>[12]</sup>与《中国肥料实用手册》<sup>[13]</sup>等参数汇总计算,吸收养分量分别为水蜜桃树  $N\ 197$ 、 $P_2O_5\ 185$ 、 $K_2O\ 378\ kg\cdot hm^{-2}$ ,葡萄树  $N\ 290$ 、 $P_2O_5\ 327$ 、 $K_2O\ 422\ kg\cdot hm^{-2}$ ,梨树  $N\ 211$ 、 $P_2O_5\ 232$ 、 $K_2O\ 260\ kg\cdot hm^{-2}$ 。按照第二次全国土壤普查土壤养分分级标准分析果园养分状况(表 1)。

土壤 pH 值采用 pH 计法测定,水土比为 2.5:1。

表1 全国第二次土壤普查养分分级标准

Table 1 Classification standards for soil fertility used by 2nd

National Soil Survey

分级	有机质/ g·kg <sup>-1</sup>	全氮/ g·kg <sup>-1</sup>	全磷/ g·kg <sup>-1</sup>	全钾/ g·kg <sup>-1</sup>	速效磷/ mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾/ mg·kg <sup>-1</sup>
1-很丰富	>40	>2	>1	>25	>40	>200
2-丰富	30~40	1.5~2	0.8~1	20~25	20~40	150~200
3-最适宜	20~30	1~1.5	0.6~0.8	15~20	10~20	100~150
4-适宜	10~20	0.75~1	0.4~0.6	10~15	5~10	50~100
5-缺乏	6~10	0.5~0.75	0.2~0.4	5~10	3~5	30~50
6-很缺乏	<6	<0.5	<0.2	<5	<3	<30

土壤全氮、有机质、全钾、全磷含量分别采用半微量凯氏定氮法、重铬酸钾容量法、氢氧化钠熔融法和硫酸-高氯酸消解法(钼锑抗比色)进行分析测定。速效钾采用 1 mol·L<sup>-1</sup> 中性醋酸铵溶液提取、火焰光度计测定。速效磷含量采用碳酸氢钠提取、钼锑抗比色法(即 Oslen 法)测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 果园养分投入特征及盈余情况

太湖竺山湾小流域果园总体氮、磷、钾平均投入量分别为 N 522、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 674、K<sub>2</sub>O 462 kg·hm<sup>-2</sup> (表 2)。就果园类型而言,总体氮、磷、钾投入水平均以梨园最高,桃园次之。从果园养分投入量分组看,不同果农间总体氮、磷、钾投入量差别较大(图 2),总体投入量在 150 kg·hm<sup>-2</sup> 以上的果农数占总调查户数的比例为桃园 94.8%、葡萄园 78.3%、梨园 82.7%,其中达 500 kg·hm<sup>-2</sup> 以上的占调查总户数的比例分别为 39.6%、24.1%和 42.9%。

进一步分析肥料投入结构,可以看出果园有机氮、磷、钾平均投入量分别高达 N 254、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 437、K<sub>2</sub>O 172 kg·hm<sup>-2</sup> (表 2),分别占总投入量的 51.3%、58.3%、44.0%(图 3)。有机氮、磷、钾投入占总投入的比例均以葡萄园最高,分别为 64.3%、75.0%、57.9%,桃园次之。可见,太湖竺山湾小流域果农比较注重施用有机肥来培肥土壤,同时也没有忽视化学肥的施用。

表 2 太湖竺山湾小流域不同类型果园养分投入量(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Nutrient inputs to three different orchards in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

果园	化学肥投入			有机肥投入			总体投入		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
桃园	243±166	221±126	300±271	260±146	398±312	183±93	503±111	619±168	483±143
葡萄园	150±146	139±147	206±161	224±210	423±411	138±128	374±129	562±218	344±103
梨园	412±260	352±218	363±256	277±217	490±513	195±126	689±169	842±279	558±143
平均	268	237	290	254	437	172	522	674	462

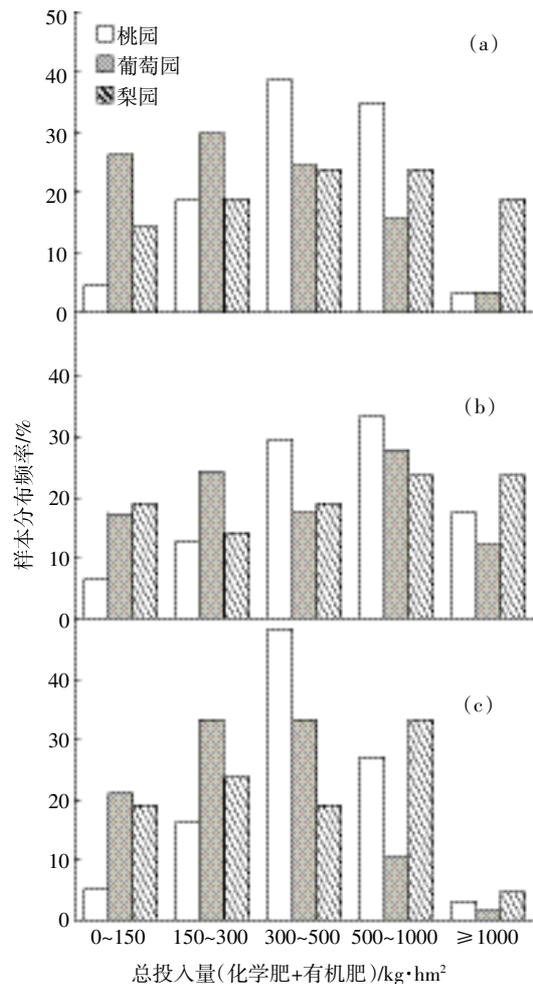


图 2 太湖竺山湾小流域果园总氮(a)、总磷(b)和总钾(c)投入量的样本分布频率

Figure 2 Frequency distribution of total N(a), total P(b) and total K(c) inputs to orchards in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

果园的有机肥投入品种多样,但主要来源于鸡粪和牛粪,其次为菜籽饼。牛粪和鸡粪都可以从附近的养殖厂购得。雪堰镇谢家村几乎每家每户都在自家所在的桃园边上建造较大的化粪池,将买来的鸡粪放入池内沤熟。相比而言,果园化学肥主要以三元复合肥为主,甚至很多果农在施用三元复合肥的基础上还加施其他化肥,如含氮量更高的尿素、磷酸二铵、碳酸氢

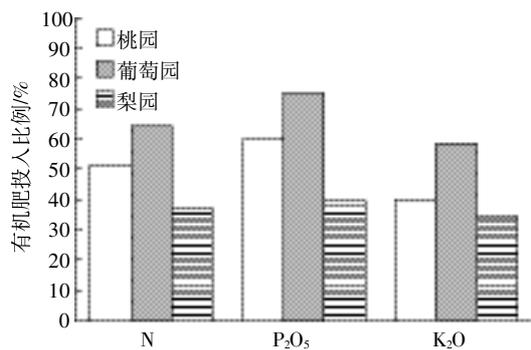


图3 太湖竺山湾小流域果园有机肥投入比例

Figure 3 Percentages of organic fertilizer in total fertilizer inputs in orchards in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

铵以及硫酸钾等(图4)。目前市面上的三元复合肥虽然氮、磷、钾比例不一,但均以高钾型复合肥为主,如康朴牌速溶诺泰克的氮、磷、钾比例为14:8:30,其目的是满足果树坐果对钾的大量需求。果园氮、磷、钾肥投入量(表2)亦表明,以化肥形式投入的钾肥略高于磷肥,而以有机肥形式投入的磷肥是钾肥的2倍多。

从肥料搭配上来看,基肥以有机肥为主,同时配以化学肥;基肥一般在秋后11月份施入,但最迟可以到来年3月份左右。基肥中有机肥的施入方式为围着树冠滴水线下整个树盘覆盖一层,然后通过机械或者人工的方式翻入土中,深度为10~20 cm;而基肥中化学肥的施入方式为沿树冠滴水线下均匀撒施(环状施肥),然后与有机肥一同翻入土中。基肥虽然可以为果树的生长提供长久、全面的营养物质,增加土壤有机质含量以及微生物活性,但是果树在花前、花芽分化、果实膨大及采收后都急需速效肥的补充(追肥),以弥补果树营养的短期不足。追肥基本上是追施化学肥,

大部分果农选择环状施肥,也有部分果农在整个树盘撒施,且都不翻入土内。果农为了省事,经常在雨前施肥,从而减少施肥后灌溉增加的工作量。以桃树为例,其追肥时间都发生在3月至9月之间,此时太湖流域雨水充沛,肥料很容易随着雨水进入水体,造成果树对肥料的利用不充分。

由图5可以看出,除了葡萄园钾素略有亏损外,果园氮磷钾养分普遍有盈余。氮、磷、钾养分盈余量以梨园最高,分别达N 509、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 610、K<sub>2</sub>O 298 kg·hm<sup>-2</sup>,其后依次为桃园和葡萄园,该盈余量顺序与果园氮、磷、钾总投入量顺序一致(表2),表明果园养分盈余量与养分总投入量呈正相关。此外,不论是桃园、葡萄园还是梨园,养分盈余量均以磷肥最突出,其次是氮肥,钾肥最低。2013年我们收集到的桃园径流水数据表明,单次降雨后径流水总氮和总磷浓度最高分别达75.3 mg·L<sup>-1</sup>(图6)。可见,太湖竺山湾小流域果园氮、磷环境负荷风险较高,盈余的氮、磷一旦遇到降雨,就

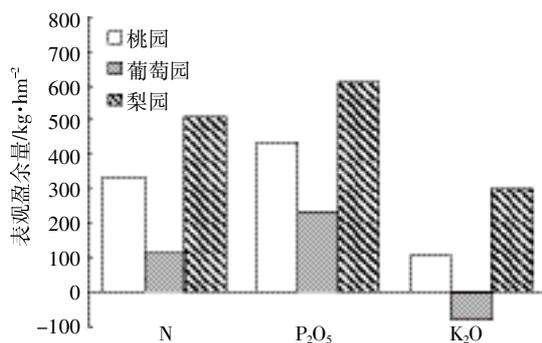


图5 太湖竺山湾小流域果园养分表观盈余量

Figure 5 Apparent surplus of nutrients in orchards in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

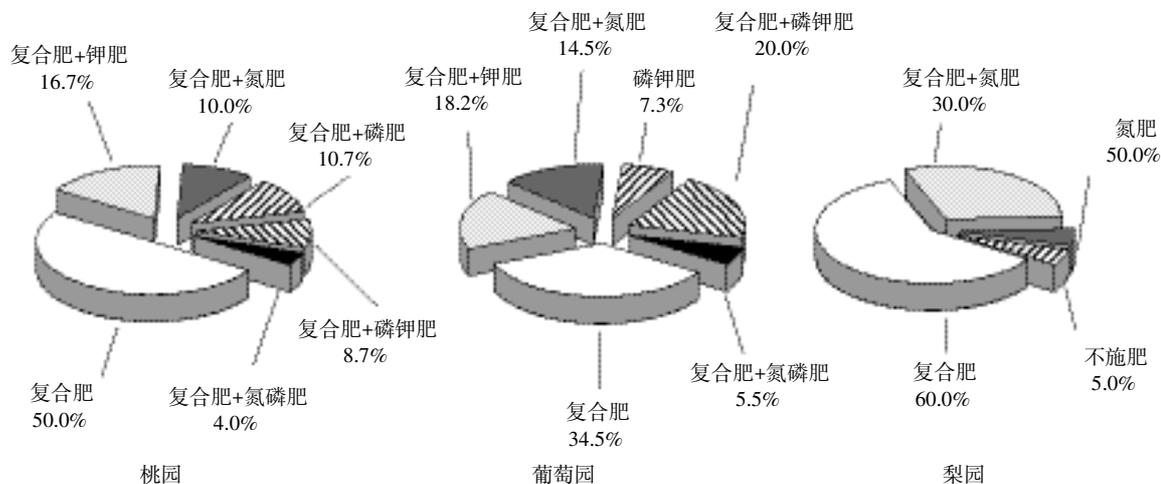


图4 太湖竺山湾小流域果园化学肥投入结构

Figure 4 Structure of chemical fertilizer inputs to orchards in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

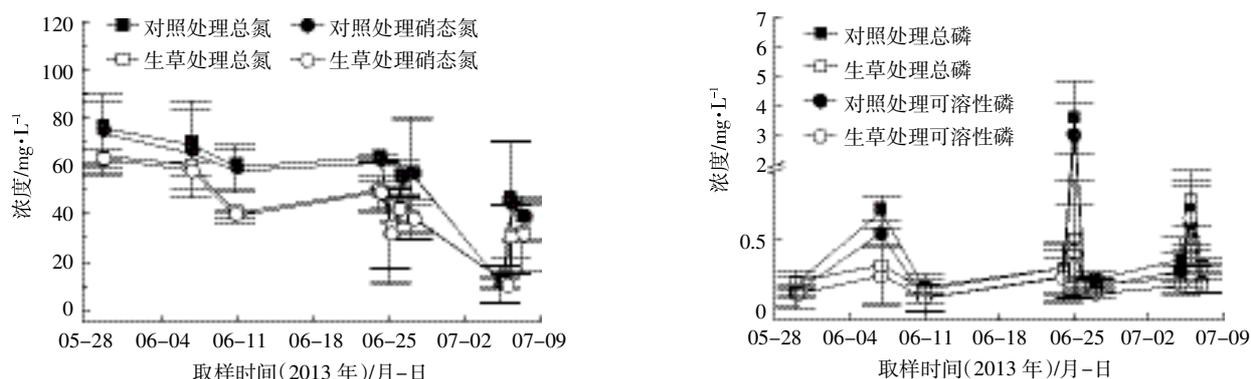


图6 太湖竺山湾小流域桃园径流水总氮、总磷、硝态氮和可溶性磷浓度变化

Figure 6 Changes in total N, total P,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and dissolved P concentrations in runoff water from peach orchard in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

会随着淋洗和径流进入水体造成地下水硝酸盐污染和湖泊水体富营养化。反之,高的养分盈余量也意味着果园养分投入还有很大的降低空间。

## 2.2 果园土壤肥力状况及其评价

由表3可知,果园土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量平均为 $30.5$ 、 $2.0$ 、 $1.3$ 、 $13.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,且桃园、葡萄园和梨园之间没有差异。根据全国第二次普查养分分级标准,果园土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量均处于1至4级水平,属于适宜至很丰富状态,无一缺乏(表4)。具体而言,有机质含量约有 $58.3\%$ 处于丰富状态,而全氮和全磷含量超过 $60\%$ 属于很丰富状态。相比而言,全钾含量约有 $89\%$ 和 $11\%$ 分别处于适宜和最适宜水平,达到丰富和很丰富的比例为零。土壤有机质、全氮、全磷和全钾是衡量土壤肥力的重要指标。它们在土壤中的富集意味着果园土壤肥力较高,供养分潜力较大,这是果农们长期大量施用有机肥的结果。

土壤速效氮、磷、钾是表征土壤供氮、磷、钾能力的重要指标,反映当季供养分能力的强弱。本调查表明速效磷和速效钾含量分别可达 $117\sim 166$ 、 $390\sim 619 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,尤以桃园最高(表3)。一般情况下,速效磷和速效钾含量分别超过 $20$ 、 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,则表明土壤速效磷和速效钾达到较丰富状态(表1)。本调查数据表

表3 太湖竺山湾小流域不同类型果园土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷钾含量状况

Table 3 Content of organic matter, total N, P and K, and available P and K in orchard soils in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

果园	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
桃园	$33.5\pm 6.5$	$2.2\pm 0.5$	$1.6\pm 0.8$	$13.3\pm 1.2$	$166\pm 94$	$619\pm 336$
葡萄园	$28.1\pm 7.1$	$1.9\pm 0.4$	$1.0\pm 0.5$	$13.2\pm 1.1$	$117\pm 80$	$434\pm 259$
梨园	$30.0\pm 7.0$	$2.0\pm 0.4$	$1.2\pm 0.6$	$13.0\pm 1.1$	$124\pm 88$	$390\pm 259$

明,果园速效磷和速效钾含量均值分别超过了 $40$ 、 $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这一最高分级标准,约有 $89\%$ 和 $91\%$ 处于很丰富水平(表4)。果园速效磷和钾含量的大量累积与施用化学肥密切相关。

表4 太湖竺山湾小流域果园土壤养分含量各等级占比(%)

Table 4 Percentages of grades of nutrients in orchard soils in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

分级	有机质	全氮	全磷	全钾	速效磷	速效钾
1-很丰富	10.9	63.3	61.9	0.0	89.4	91.3
2-丰富	58.3	28.4	21.6	0.0	8.3	3.2
3-最适宜	28.0	7.8	12.4	11.0	2.3	5.5
4-适宜	2.8	0.5	4.1	89.0	0.0	0.0

土壤酸碱性是影响土壤养分有效性的重要因素之一,大多数养分在pH为 $6.5\sim 7.0$ 时有效性最高或接近最高。就磷来讲,土壤pH为5时,其中活性铁、铝较多,常与磷肥中水溶性磷酸盐形成溶解度很小的磷酸铁、磷酸铝盐类,从而降低其有效性;而pH为7时,水溶性磷酸盐易与土壤中游离的钙离子作用,生成磷酸钙盐,使其有效性明显降低。总体来看,竺山湾小流域果园土壤基本上处于酸性状态,仅有不到 $2.9\%$ 的土壤样本处于中性和碱性状态。果园土壤pH均值为 $5.2$ ,最高值为 $7.9$ ,最小值为 $4.0$ ,最高值和最小值均出现在桃园土壤。pH值分布在 $4.5\sim 5.5$ 的强酸性区间的土壤比例最高,为桃园 $50.6\%$ 、梨园 $55.0\%$ 、葡萄园 $78.1\%$ 。其次是分布在酸性极强(pH $< 4.5$ )和酸性(pH $5.5\sim 6.5$ )这两个区间内(图7)。尤其是梨园土壤,在pH $< 4.5$ 的酸性极强范围内的比例高达 $30.0\%$ 。可见,太湖流域果园土壤酸化现象严重,不同果园类型的酸化程度不一。长期大量地施用化学氮

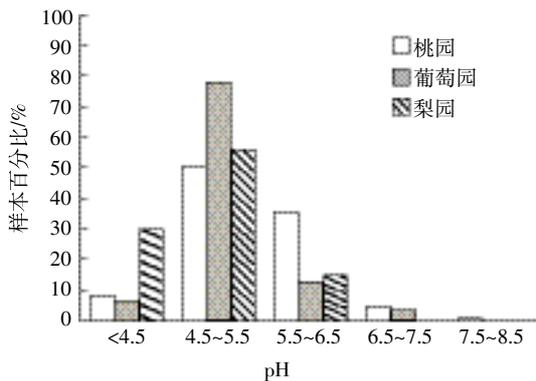


图7 太湖竺山湾小流域果园土壤 pH 分布情况

Figure 7 Distribution of soil pH values in three different orchards in Zhushan Bay in Taihu Lake Watershed

肥会刺激氨氧化细菌的增长,进而促进自养硝化作用,而硝化过程释放  $H^+$  的致酸效应,必然加剧果园土壤酸化。

### 3 讨论

当前太湖地区一个稻麦轮作季投入的化学氮肥和磷肥分别达  $N\ 500\sim 600$ 、 $P_2O_5\ 120\ kg\cdot hm^{-2}$ ,且基本上不再施用有机肥<sup>[4-6]</sup>。本调查表明稻改果后,总氮投入量相当,但是总氮投入结构发生改变,果园普遍投入有机肥,其投入量占总氮投入量的比例约为 51.3% (图 3)。与总氮相比,稻田改为果园后,总磷投入量和投入结构均发生改变,果园总磷投入量是一个稻麦轮作季总磷投入量的 5.6 倍,其中约有 58.3% 来自于有机肥。可见,太湖竺山湾小流域果园重视有机肥投入,这不仅是因为果农意识到有机肥具有培土、增产以及改善果实品质的功效,还因为施用有机肥比较费工费时,农户更愿意把有机肥投入到经济效益更高的蔬菜和水果等经济作物上。

虽然太湖竺山湾小流域果园每年的养分总投入量高达  $N\ 522$ 、 $P_2O_5\ 674\ kg\cdot hm^{-2}$  (表 2),但果树每年因收获带走的养分却低于  $N\ 300$ 、 $P_2O_5\ 327\ kg\cdot hm^{-2}$ <sup>[12-14]</sup>。年年重复施肥进一步加剧养分过剩,超过果树需求和土壤固持的那部分养分势必会通过特定的途径而损失。对北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查发现,凡是年施氮量超过  $500\ kg\cdot hm^{-2}$ 、作物氮素吸收量与施氮量之比低于 40% 的地区,地下水硝酸盐含量基本全部超标<sup>[15]</sup>。可见,太湖竺山湾小流域果园周边的地下水硝酸盐污染风险较大。此外,太湖地区雨水丰富,河网密集,盈余的氮、磷养分会通过降雨径流进入水体,造成水体富营养化。当地果农选择在雨前施肥势必加剧氮、磷流失风险。不仅如此,过量的施用氮肥

还会加速土壤酸化过程,氮肥用量超过  $80\ kg\cdot hm^{-2}$  (铵态氮肥)即可加速土壤酸化进程<sup>[16]</sup>。目前,太湖竺山湾小流域 82.3% 的果园土壤 pH 值处在 4.5~6.5 的强酸性区间,分布在酸性极强 ( $pH < 4.5$ ) 范围的土壤也占到了 14.9%。相比而言,太湖流域水稻土  $pH > 6.5$  的比例高达 45.0%<sup>[17]</sup>。可见稻改果加剧了土壤酸化。

针对太湖流域果园目前的氮、磷肥高投入以及大量的氮、磷盈余现状,必须采取既能保证高产又能节省氮、磷投入同时减少环境压力的节氮控磷措施。太湖流域果园施用的复合肥基本上是含铵态氮和硝态氮的三元复合肥,铵态氮很容易被氨氧化菌氧化成为硝态氮。2013 年我们收集到的桃园径流水数据亦证实,径流水中氮的形态基本上是硝态氮 (图 6)。此外,硝态氮易被雨水和灌溉水淋洗到土壤坡面下层,造成地下水硝酸盐污染。可见,果园控制氮流失应从减少氮肥投入和抑制硝化作用入手,并辅以行之有效的拦截措施。硝化抑制剂又称氮肥增效剂,其作用机理是抑制土壤亚硝酸细菌对铵态氮的硝化,从而减少铵态氮转化为硝态氮而流失,积累铵态氮提高氮肥利用率<sup>[18]</sup>。目前市面上的硝化抑制剂主要有双氰胺 (DCD)、2-氯-6-(三氯甲基)吡啶 (Nitrapyrin)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP) 等,尽管其施用效果受氮源、施氮量、施氮时间、灌溉水 (或降雨) 量、作物种类等多种因素的影响,但众多研究结果均表明,施用硝化抑制剂对减少农田生态系统硝酸盐淋溶损失和氮氧化物排放作用显著<sup>[19]</sup>。然而,目前关于硝化抑制剂在太湖流域果园生态系统中抑制硝化作用的研究则鲜见报道。硝化抑制剂的种类、用量、抑制效果,抑制时间长短以及是否增产因土壤和作物类型而改变,因此急需筛选专门针对果园生态系统的硝化抑制剂。

已有研究表明,果园生草不仅可以提高土壤肥力,还可减少果园土壤磷素流失<sup>[20]</sup>。图 6 的结果表明,宜兴水蜜桃园生草处理可以有效减少径流水氮、磷浓度。可见,在减少硝态氮产生的同时,采取有效的氮、磷拦截措施可以进一步减少氮、磷的流失。

### 4 结论

(1) 太湖竺山湾小流域果园总体氮、磷、钾平均投入量分别为  $N\ 522$ 、 $P_2O_5\ 674$ 、 $K_2O\ 462\ kg\cdot hm^{-2}$ ,其中来自于有机肥的比例分别为 51.3%、58.3%、44.0%。化学肥品种主要为氮、磷、钾三元复合肥,而有机肥主要以鸡粪和牛粪为主,其次是菜籽饼。

(2) 长期的有机无机配施提高了果园土壤的基础

肥力。土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量均处于适宜至很丰富水平,土壤速效磷和速效钾也基本上处于较丰富状态。

(3) 高投入不可避免导致养分大量盈余。氮、磷、钾养分盈余量以梨园最高,分别达 N 509、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 610、K<sub>2</sub>O 298 kg·hm<sup>-2</sup>,其后依次为桃园、葡萄园。大量的氮、磷盈余,即使当季不流失,之后也会通过径流、淋洗、氨挥发和反硝化而损失。

(4) 当前,太湖流域果园种植面积逐年增加,为了保证果园高产且又能节省氮磷的投入和减少环境压力,优先考虑减少氮、磷、钾养分直接投入的同时,研发基于总量控制的平衡施肥方式(有机无机配施)、配合施用果树专用硝化抑制剂,再结合有效的氮磷拦截措施,可有效减少氮、磷流失。另外,还需加强果树氮、磷循环的基础研究,如通过<sup>15</sup>N示踪方法对氮素进行田间定位跟踪,摸清肥料氮的各个去向,如果树吸收、土壤残留、淋洗、径流、氨挥发、反硝化各自所占比例,以便为果园生态系统氮、磷减排提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.  
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in china and the alleviating strategies: I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [2] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.  
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [3] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888.  
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [5] 周 杨, 司友斌, 赵 旭, 等. 太湖流域稻麦轮作农田氮肥施用状况、问题和对策[J]. 土壤, 2012, 44(3): 510-514.  
ZHOU Yang, SI You-bin, ZHAO Xu, et al. Situation, problems and countermeasures in nitrogen fertilization in rice/wheat rotation paddy field of Taihu Lake Watershed, China[J]. *Soils*, 2012, 44(3): 510-514.
- [6] Gilbert N. Environment: The disappearing nutrient[J]. *Nature*, 2009, 461: 716-718.
- [7] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in Southern China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76: 1068-1078.
- [8] 闵 炬, 陆扣萍, 陆玉芳, 等. 太湖地区大棚菜地土壤养分与地下水水质调查[J]. 土壤, 2012, 44(2): 213-217.  
MIN Ju, LU Kou-ping, LU Yu-fang, et al. Investigation of fertility and quality of ground water in green house vegetable fields of Tai Lake Region[J]. *Soils*, 2012, 44(2): 213-217.
- [9] 李 冰, 毕 军, 田 颖, 等. 太湖流域重污染区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 地理科学, 2012, 32(4): 471-476.  
LI Bing, BI Jun, TIAN Ying, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in the heavy polluted area in Taihu Lake Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(4): 471-476.
- [10] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 24-200.  
The National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer nutrients[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 24-200.
- [11] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 44-45.  
The National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer resources[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 44-45.
- [12] 高祥照, 申 眺, 郑 义. 肥料实用手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 259-265, 386-387.  
GAO Xiang-zhao, SHEN Tiao, ZHENG Yi. Fertilizer practice book[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2002: 259-265, 386-387.
- [13] 中国化工企业管理协会. 中国肥料实用手册[M]. 北京: 中国国际广播音像出版社, 2006: 824, 834.  
China Chemical Industry Management Committee. China fertilizer practice book[M]. Beijing: China and International Broadcasting Video Press, 2006: 824, 834.
- [14] 卢树昌, 陈 清, 张福锁, 等. 河北省果园氮素投入特点及其土壤氮素负荷分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 858-865.  
LU Shu-chang, CHEN Qing, ZHANG Fu-suo, et al. Analysis of nitrogen input and soil nitrogen load in orchards of Hebei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 858-865.
- [15] 张维理, 田哲旭, 张 宁, 等. 我国北方农田氮肥造成的地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 80-87.  
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agricultural in north China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2): 80-87.
- [16] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385-388.

- XU Ren-kou, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 385-388.
- [17] 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[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 720-727.  
WANG Zhi-gang, ZHAO Yong-cun, LIAO Qi-lin, et al. Spatio-temporal variation and associated affecting factors of soil pH in the past 20 years of Jiangsu Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 720-727.
- [18] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1389-1395.  
SUN Zhi-mei, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms.[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1389-1395.
- [19] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 硝化抑制剂的施用效果、影响因素及其评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1611-1618.  
SUN Zhi-mei, WU Zhi-jie, CHEN Li-jun, et al. Application effect, affecting factors, and evaluation of nitrification inhibitor: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1611-1618.
- [20] 李德荣, 董闻达, 王锋尖, 等. 红壤坡地果园不同水土保持措施对磷素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 81-84.  
LI De-rong, DONG Wen-da, WANG Feng-jian, et al. Influence of different soil and water conservation measurements on phosphorus loss on orchard slope land of red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 81-84.

## 欢迎订阅 2015 年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版是由农业部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学;耕作栽培·生理生化·农业信息技术;植物保护;土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境;园艺;贮藏·保鲜·加工;畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院所(所)、大专院校的科研、教学与管理人人员。

《中国农业科学》中文版为半月刊,影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊最前列或前列位次。为北京大学图书馆 1992—2011 年连续 6 次遴选的核心期刊,位居《中文核心期刊要目总览》“农业综合类核心期刊表”的首位。1999—2008、2013—2014 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助。1999 年获“首届国家期刊奖”,2003、2005 年获“第二、三届国家期刊奖提名奖”;2002—2013 年先后 11 次被中国科学技术信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号;2009 年获中国期刊协会/中国出版科学研究院“新中国 60 年有影响力的期刊”称号;2010、2013 年荣获“第二、三届中国出版政府奖期刊提名奖”,2013 年获新闻出版广电总局“百强科技期刊”称号;2012、2013 年获清华大学图书馆等“2012、2013 中国最具国际影响力学术期刊”称号。

《中国农业科学》中文版大 16 开,每月 1、16 日出版,国内外公开发行。每期 208 页,定价 49.50 元,全年定价 1188.00 元。国内统一连续出版物号:CN 11-1328/S,国际标准连续出版物号:ISSN 0578-1752,邮发代号:2-138,国外代号:BM43。

《中国农业科学》英文版(*Agricultural Sciences in China*, ASA),2002 年创刊,月刊。2012 年更名为《农业科学学报》(*Journal of Integrative Agriculture*, JIA)。2006 年 1 月起与国际著名出版集团 Elsevier 合作,全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2009 年被 SCI 收录,2013 年 JIA 影响因子为 0.625。

JIA 大 16 开,每月 20 日出版,国内外公开发行。每期 180 页,国内订价 80.00 元,全年 960.00 元。国内统一连续出版物号:CN 10-1039/S,国际标准连续出版物号:ISSN 2095-3119,邮发代号:2-851,国外代号:1591M。

《中国农业科学》中、英文版均可通过全国各地邮局订阅,也可向编辑部直接订购。

邮编:100081; 地址:北京 中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电话:010-82109808,82106281,82105098; 传真:010-82106247

网址:www.ChinaAgriSci.com; E-mail:zgnykx@caas.cn

联系人:林鉴非