

DOI: 10.11766/trxb202204060091

杨广, 汪玉, 王慎强, 赵旭. 阳山水蜜桃园肥料投入及不同种植年限土壤养分累积现状[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1712–1723.

YANG Guang, WANG Yu, WANG Shenqiang, ZHAO Xu. Characteristics of Fertilizer Inputs and Soil Nutrient Accumulation in Yangshan Juicy Peach Orchard with Different Cultivation Years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(6): 1712–1723.

阳山水蜜桃园肥料投入及不同种植年限土壤养分累积现状*

杨广^{1, 2}, 汪玉¹, 王慎强^{1, 2†}, 赵旭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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 阳山水蜜桃为中国国家地理标志产品, 土肥科学管理对其产业的可持续发展至关重要。选择 4 个主要水蜜桃种植镇含不同种植年限的 33 块桃园为研究对象, 通过实地问卷调查结合室内土壤样品分析, 以摸清水蜜桃园肥料投入结构, 分析桃园土壤养分丰缺状况及生态化学计量特征。结果表明: 桃园氮、磷、钾平均总投入量分别为 527 kg·hm⁻² (以 N 计)、362 kg·hm⁻² (以 P₂O₅ 计)、545 kg·hm⁻² (以 K₂O 计), 以三元复合肥为主的化肥来源占比较大, 而菜籽饼、牛粪、鸡粪、秸秆等有机来源的氮、磷、钾分别占投入总量的 27.8%、15.4%、15.6%。种植大于 10 年的桃园 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤 pH 均达到了强酸性水平 (4.5 < pH < 5.5)。根据第二次全国土壤普查养分分级标准, 桃园土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量基本处于 3 级及以上标准, 0~20 cm 土壤 C: N、C: P、N: P 随着种植年限的增加不断降低, 种植 10 年以上的桃园土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量已经达到了 1 级水平, 桃园土壤硝态氮含量范围在 19.3~33.1 mg·kg⁻¹。N、P₂O₅、K₂O 的当季表观盈余量分别为 343 kg·hm⁻²、238 kg·hm⁻²、240 kg·hm⁻²。综上, 水蜜桃园连年高养分投入加剧土壤酸化和养分累积, 土壤氮磷残留量过高, 增加其流失风险, 亟需研究并提出减肥增效、减排控失、高产保质的桃园绿色生产模式。

关键词: 阳山水蜜桃; 肥料投入; 种植年限; 氮磷钾; 化学计量特征

中图分类号: S158.9 文献标志码: A

Characteristics of Fertilizer Inputs and Soil Nutrient Accumulation in Yangshan Juicy Peach Orchard with Different Cultivation Years

YANG Guang^{1, 2}, WANG Yu¹, WANG Shenqiang^{1, 2†}, ZHAO Xu¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】The objective of this study was to clarify the status of soil nutrient accumulation in the peach orchard of Taihu Watershed. It aimed to provide a guide for the green production mode of peach orchard. 【Method】In this study, a total of 66 soil samples were collected from 33 juicy peach orchards, with different cultivation years in the four main planting towns.

* 国家重点研发计划项目(2021YFD1700801)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD1700801)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: sqwang@issas.ac.cn

作者简介: 杨广(1995—), 男, 博士研究生, 从事果园氮素循环及环境效应研究。E-mail: willthyang@163.com

收稿日期: 2022-04-06; 收到修改稿日期: 2022-06-23; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-08-24

Combined with field research and laboratory analysis, the fertilizer input status, soil nutrient content and ecological stoichiometry characteristics were analyzed. 【Result】 The results showed that the average total nutrient inputs was N 527 kg·hm⁻², P₂O₅ 362 kg·hm⁻² and K₂O 545 kg·hm⁻², and the proportion of organic inputs were 27.8%, 15.4% and 15.6% respectively. Here chemical fertilizer was mainly NPK compound fertilizer, while the types of organic fertilizer applied mainly included rapeseed cake, livestock manure, and composting straw. Over-application of fertilizer could aggravate soil acidification and nutrient accumulation, soil pH in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers of planted >10 years peach orchard both decreased by more than 1.5 units, which belonged to strongly acidic soil (4.5<pH<5.5). According to the 2nd National Soil Survey of soil fertility classification standards, soil organic matter, total nitrogen, phosphorus and potassium in 0–20 cm and 20–40 cm soil layers reached level 3 or above, and the C: N, C: P and N: P ratios in 0–20 cm soil layer decreased with an increase of cultivation years. Soil alkali-hydrolytic nitrogen, available phosphorus and potassium of planted >10 years peach orchard reached level 1. The soil NO₃⁻-N concentration of the peach orchard was up to 19.3–33.1 mg·kg⁻¹. The annual apparent surplus of N, P₂O₅, K₂O were 343 kg·hm⁻², 238 kg·hm⁻² and 240 kg·hm⁻¹, respectively. 【Conclusion】 The excessive nutrient input in the peach orchard has aggravated soil acidification and nutrient accumulation. A high concentration of nitrogen and phosphorus accumulated in the soil might increase the environmental loss risk. Therefore, it is necessary to put forward a green production model for the peach production.

Key words: Yangshan juicy peach; Fertilizer inputs; Cultivation years; Nitrogen, phosphorus and potassium; Stoichiometric characteristic

种植业氮磷流失导致的水体污染已成为农业生产过程中的重要环境问题^[1]。国家水专项“太湖流域水环境承载力评估与综合调控技术研究与应用”课题对2018年太湖流域污染负荷的来源分析表明,种植业氮磷流失对太湖水体总氮和总磷的贡献比率分别达21%和29%^[2]。太湖流域传统种植主要以稻麦轮作为主,随着种植业结构调整和经济利益的驱动,蔬菜和果树种植面积逐渐增大,与此同时肥料投入的种类和数量也随之发生变化。有调查研究报道太湖流域地区稻麦轮作氮肥年投入量为600 kg·hm⁻²(以N计,下同)^[3],蔬菜种植氮肥年投入量高达1000 kg·hm⁻²^[4],果园最高投入量可达858 kg·hm⁻²^[5]。稻作改种蔬菜、果树后,耕地复种指数增高、大量施肥、管理粗放等问题突出^[6],不仅导致肥料利用率降低,而且在充沛的雨、水等条件下,多余的氮磷养分随着地表径流、土壤渗漏从农田间流失进入水体,影响地表水和地下水的水体质量^[4]。

太湖流域是我国桃树四大种植基地之一,仅苏、锡、常地区的种植面积已超过了1万hm²^[7-9],其产值可达15~25万元·hm⁻²,已经形成以国家地理标志产品阳山水蜜桃为龙头特色的农业生产模式,其水蜜桃栽培系统入选“中国重要农业文化遗产”名录。但目前对于桃园施肥量、施肥方式、施肥类型的相关基础背景数据鲜有报道,尤其是随着种植

年限的增加,桃园土壤养分累积状况、碳氮磷的生态化学计量比、氮磷盈余量等特征及其变化如何,需要详细调查研究,以便为桃园土壤养分管理提供科学决策。本研究以太湖流域地区种植面积较大的水蜜桃为研究对象,选取不同种植年限的桃园,实地调查其肥料投入类型、投入量和施肥方式,分析了不同种植年限桃园土壤养分状况,评价了其氮磷养分流失风险,可为桃园土壤健康管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 调查与采样

太湖流域面积约3.6万km²,是我国的第三大淡水湖。该地区年降水量充沛,多年平均降水量为1181mm,其中年降雨的60%集中在5—9月。雨、水资源充沛,河道密布,纵横交错。流域年平均气温为15~17℃,自北向南递增。太湖流域的无霜期为243d,光热资源丰富,气候条件优越,适宜水稻、果蔬种植,是我国重要的粮食及经济作物产区。

调查区域选取在果蔬种植较为发达的苏南地区,调查点选在水蜜桃种植相对密集的无锡市周铁镇、阳山镇、胡埭镇,以及常州市雪堰镇(图1)。每个调查镇选择不同种植年限且种植面积0.3hm²

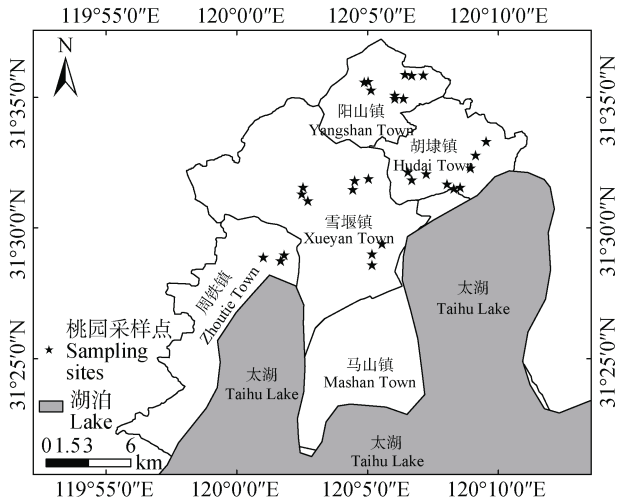


图1 桃园采样点分布图

Fig. 1 Soil sampling sites of peach orchard and study areas

以上的桃园进行土壤采样,采用GPS定位采样点,调查并记录采样点农户的施肥时期、施肥类型、施肥量、施肥方法等。以冬季修剪后桃树休眠期(11—12月)至果实成熟期(来年7—8月)作为桃园管理中的一个生长周期。养分投入量不包括灌溉水及大气沉降带入的养分,化学肥料养分按照调查点农户施用的肥料包装袋上标识的养分含量进行计算。有机肥料的养分投入根据《中国有机肥料养分志》^[10]和《中国有机肥料资源》^[11]的参数计算(以鲜基计),或在调查点取样后带回实验室测定其氮、磷、钾养分含量后进行相应的计算。在不考虑养分的环境损失及大气沉降养分输入下,养分盈余按下式计算:养分盈余=输入项(化肥养分+有机肥养

分)—输出项(作物当季吸收量)。按照无锡、常州、苏州统计年鉴^[7-9]数据计算桃园产量约为 $18\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;按照《中国肥料实用手册》^[12]和《果树栽培学各论(南方本)》^[13]等参数计算一个生长周期内桃树的当季养分吸收量分别为 $\text{N } 184\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\ 124\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 306\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

于2021年10月桃树休眠期进行土壤采样。充分考虑代表性和减少系统误差,选取 0.3 hm^{-2} 以上种植面积的桃园进行调查、采样,按照随机多点混合的原则,采用“S”形采样法,在每个果园相对中心的位置随机选取5棵长势相近且具有代表性的桃树,沿树干水平距离 $0\sim 40\text{ cm}$ 、 $40\sim 80\text{ cm}$ 、 $80\sim 120\text{ cm}$ 均匀采取 $0\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层的土壤样品,并将其混匀作为该点果园的土壤样品。各采样点土壤样品混合均匀后,装入塑料袋密封,登记编号,将土壤样品自然风干过筛,密闭保存后用于土壤理化性质测定。本次共选取80户果农调查其植桃时的养分投入情况,选取33个具有代表性的不同种植年限桃园进行土壤采样。

1.2 测定指标及方法

供试土壤测定指标包括土壤pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾,测定方法参照《土壤农化分析》^[14]。土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 采用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl浸提,浸提液使用AA3连续流动分析仪(Skalar,布雷达,荷兰)测定。按照第二次全国土壤普查养分分级指标^[15]对桃园土壤养分等级进行评估(表1)。土壤的碳氮磷化学计量比均采用元素质量比进行计算。

表1 全国第二次土壤普查养分分级标准

Table 1 Classification standards of soil fertility used by the 2nd National Soil Survey

	有机质 ^① / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 ^② / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 ^③ / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 ^④ / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ^⑤ / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 ^⑥ / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 ^⑦ / ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
一级(极丰富) ^⑧	>40	>2	>1	>25	>150	>40	>200
二级(丰富) ^⑨	30-40	1.5-2	0.8-1	20-25	120-150	20-40	150-200
三级(最适宜) ^⑩	20-30	1-1.5	0.6-0.8	15-20	90-120	10-20	100-150
四级(较适宜) ^⑪	10-20	0.75-1	0.4-0.6	10-15	60-90	5-10	50-100
五级(缺乏) ^⑫	6-10	0.5-0.75	0.2-0.4	5-10	30-60	3-5	30-50
六级(极缺乏) ^⑬	<6	<0.5	<0.2	<5	<30	<3	<30

① Organic matter; ② Soil total nitrogen; ③ Soil total phosphorus; ④ Soil total potassium; ⑤ Alkali-hydrolyzable nitrogen; ⑥ Available phosphorus; ⑦ Available potassium; ⑧ Level 1 (extremely high); ⑨ Level 2 (high); ⑩ Level 3 (upper middle); ⑪ Level 4 (medium); ⑫ Level 5 (inferior); ⑬ Level 6 (extremely low) .

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行整理汇总。采用 SPSS 26 对数据进行统计分析, 运用单因素方差分析 (ANOVA) 进行显著性检验和皮尔森 (Pearson) 相关分析。采用 Origin 2021、ArcMap 10.2 进行图像绘制。

2 结 果

2.1 太湖流域桃园养分投入特征及盈余量

该调查区域桃园总体氮、磷、钾投入量为 N 527 kg·hm⁻²、P₂O₅ 362 kg·hm⁻²、K₂O 545 kg·hm⁻² (表 2), 其中化学肥料养分投入量为 N 366 kg·hm⁻²、P₂O₅ 301 kg·hm⁻²、K₂O 446 kg·hm⁻², 有机肥料养分投入量为 N 147 kg·hm⁻²、P₂O₅ 53.2 kg·hm⁻²、K₂O 82.8 kg·hm⁻², 有机氮、磷、钾投入量占总养分投入比例分别为 27.8%、15.4%、15.6%。调查结果表明, 桃园果农虽然比较重视有机肥料的施用, 但化学养分投入依旧是桃园养分的主要来源。

桃园有机肥投入品种较复杂, 果农常施用的有机肥主要包括菜籽饼、发酵大豆、鸡粪、秸秆、牛粪等。化学养分投入主要以三元复合肥为主, 在此基础上, 追施尿素、硫酸钾等含氮钾量更高的化肥。同时在桃树不同生长时期的施肥量、施肥类型、施肥方法也有所不同 (表 2)。基肥通常是有机无机配施, 在桃树休眠期 (即 11 月—次年 2 月) 进行施肥, 在这一时期伤及根系的农事活动对桃树生长影响较小, 可以进行开沟深施。基肥中的复合肥多选用氮、磷、钾均衡的肥料, 如 N:P₂O₅:K₂O 为 18:18:18、15:15:15、20:20:20 以及 17:17:17。大

多数桃园基肥的施肥方法是在树冠滴水线 (距离树盘 40~60 cm) 环状开沟深施, 开沟深度为 10~20 cm 左右, 有的则在树盘周围撒施有机肥和复合肥并进行翻土覆盖。果树不同时期的追肥也有所差异, 开花期追肥通常采用有机无机配施, 坐果期和果实膨大期基本上是单施化学肥料。追肥所使用的化学肥料大多数为高氮、高钾的三元复合肥, 如 N:P₂O₅:K₂O 为 13:10:20、19:5:25、12:11:18 等。其施肥方法也有所差异, 在调查样本中 31% 的果农采用环状沟施, 11% 采用条带沟施, 超过 50% 的选择在树盘附近撒施。追肥时间多在 3—7 月, 该时期太湖流域地区降雨量较大, 雨水密集, 在雨前或者雨后施肥, 肥料养分易随地表径流或者土壤渗漏进入水体, 造成养分损失, 降低肥料利用率。

桃园不同养分的当季表观盈余量 (表 3) 分别为 N 343 kg·hm⁻²、P₂O₅ 238 kg·hm⁻²、K₂O 240 kg·hm⁻², 各养分最高盈余量可达 N 618 kg·hm⁻²、P₂O₅ 441 kg·hm⁻²、K₂O 604 kg·hm⁻²。调查结果表明, 桃园养分投入量远高于果树吸收量, 大量养分残留于土壤中。

2.2 不同种植年限桃园土壤 pH

调查区域桃园土壤 pH 随种植年限的变化趋势如图 2a 所示, 0~20 cm 土层土壤中, 种植小于等于 3 年土壤 pH 6.46, 种植 4~6 年、7~10 年及大于 10 年的 pH 分别下降 1.01、1.39 和 1.89。20~40 cm 土层土壤 pH 中, 种植 3 年以下的 pH 6.95, 属于中性水平, 种植 4~6 年、7~10 年及大于 10 年的 pH 分别下降 0.93、1.49、1.59。种植大于 10 年的 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤 pH 已经达到强酸性水平 (4.5<pH<5.5)。

表 2 桃园不同时期养分投入量

Table 2 Nutrient inputs to peach orchard in different growth stages/ (kg·hm⁻²)

施肥时期 Fertilization stages	复合肥 Compound fertilizer			有机肥 Organic fertilizer		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
休眠期 Dormant stage	190 ± 60.8	188 ± 62.0	202 ± 61.2	92.8 ± 45.8	28.0 ± 9.9	47.6 ± 13.5
开花期 Bloom stage	62.2 ± 17.2	47.2 ± 25.5	83.5 ± 27.2	54.6 ± 23.7	26.0 ± 13.9	36.2 ± 12.0
坐果期 Fruit setting stage	60.3 ± 16.1	45.0 ± 24.8	83.2 ± 28.2	—	—	—
果实膨大期 Pit hardening stage	61.3 ± 39.8	24.2 ± 24.4	90.1 ± 55.2	—	—	—
总施用量 Total application	366 ± 78.3	301 ± 76.7	446 ± 107.3	147 ± 54.2	53.2 ± 15.4	82.2 ± 19.2

注: 数据体现形式为平均值 ± 标准偏差; “—” 表示该时期无肥料投入。Note: Data were expressed as mean ± SD; “—” represented no fertilization in this stage.

表 3 桃园不同类型养分的当季表现盈余量

Table 3 Annual apparent surplus of nutrients of peach orchards/ (kg·hm⁻²)

养分类型 Type	养分平均盈余量 Mean nutrient surplus	盈余范围 Range
N	343	138~618
P ₂ O ₅	238	88.6~441
K ₂ O	240	26.9~604

随着种植年限的增加，桃园土壤 pH 降低的趋势明显。不同土层深度土壤的 pH 与种植年限呈极显著负相关 ($P < 0.001$)，以种植年限为自变量，土壤 pH 为因变量，拟合得到不同土层土壤 pH 与种植年限之间的一元一次方程 (图 2b) 如下所示：

$$Y_1 = -0.189X + 6.772 \quad R^2 = 0.659 \quad P < 0.001$$

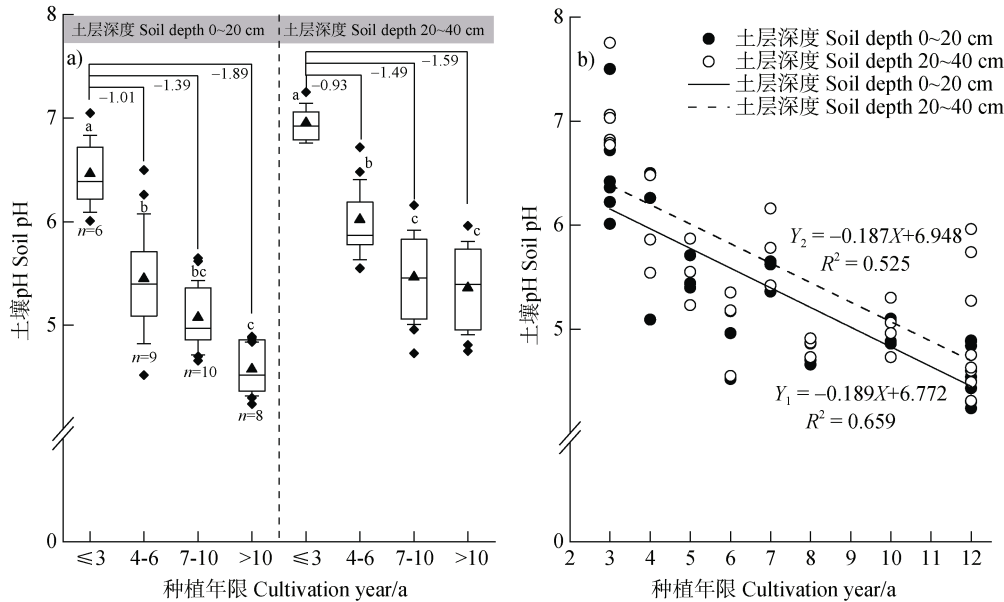
$$Y_2 = -0.187X + 6.948 \quad R^2 = 0.525 \quad P < 0.001$$

式中， Y_1 表示 0~20 cm 土层土壤 pH， Y_2 表示 20~40 cm 土层土壤 pH， X 表示桃园种植年限。方程中回归系数的绝对值大小能够直接反映自变量对因变量的贡献程度，在此回归模型中， Y_1 的回归系数为

-0.189， Y_2 的回归系数为 -0.187， Y_1 的回归系数绝对值大于 Y_2 ，说明种植年限对 0~20 cm 土壤 pH 的影响要大于对 20~40 cm 土壤 pH 的影响。

2.3 不同种植年限桃园土壤有机质、全氮、全磷及全钾

桃园土壤有机质、全氮、全磷和全钾变化规律如图 3 所示。随着种植年限的不断增加，0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量均不断增加。不同土层土壤有机质含量变化 (图 3a) 中，0~20 cm 土层含量变化范围在 11.5~37.8 g·kg⁻¹，种植 3 年以下、4~6 年的有机质平均含量分别为 15.6 和 19.5 g·kg⁻¹，种植 7~10 年及种植大于 10 年的有机质平均含量则达到了 34.9 和 32.5 g·kg⁻¹。20~40 cm 土层有机质含量略低于 0~20 cm 土层，变化范围在 7.96~26.1 g·kg⁻¹，种植 7~10 年的含量最高。不同土层土壤全氮含量随着种植年限的变化中 (图 3b)，种植 3 年以下、4~6 年的全氮含量较低，种植 7~10 年及种植 10 年以上的全氮含量较高。0~20 cm 土层土壤全氮的变化范围在



注：不同小写字母表示同一土层深度处理间差异显著 ($P < 0.05$)；实心菱形“◆”为离群值，中间实线代表中位数，实心三角形“▲”为平均值；上下两条线分别代表 75% 和 25% 的置信区间；上下两个短线分别代表 95% 和 5% 的置信区间。下同。Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments with the same soil depth ($P < 0.05$); The solid diamond “◆” represents the outlier, the solid line in the box represents the median value, and the solid triangle “▲” represents the average value. The upper and lower line represent 75% and 25% confidence intervals, respectively. The upper and lower dots represent 95% and 5% confidence intervals, respectively. The same as below.

图 2 不同种植年限桃园土壤 pH 变化特征 (a) 及 pH 与种植年限的相关性 (b)

Fig. 2 Changes of soil pH with different cultivation years (a) and the correlation between pH and cultivation years (b) in peach orchard

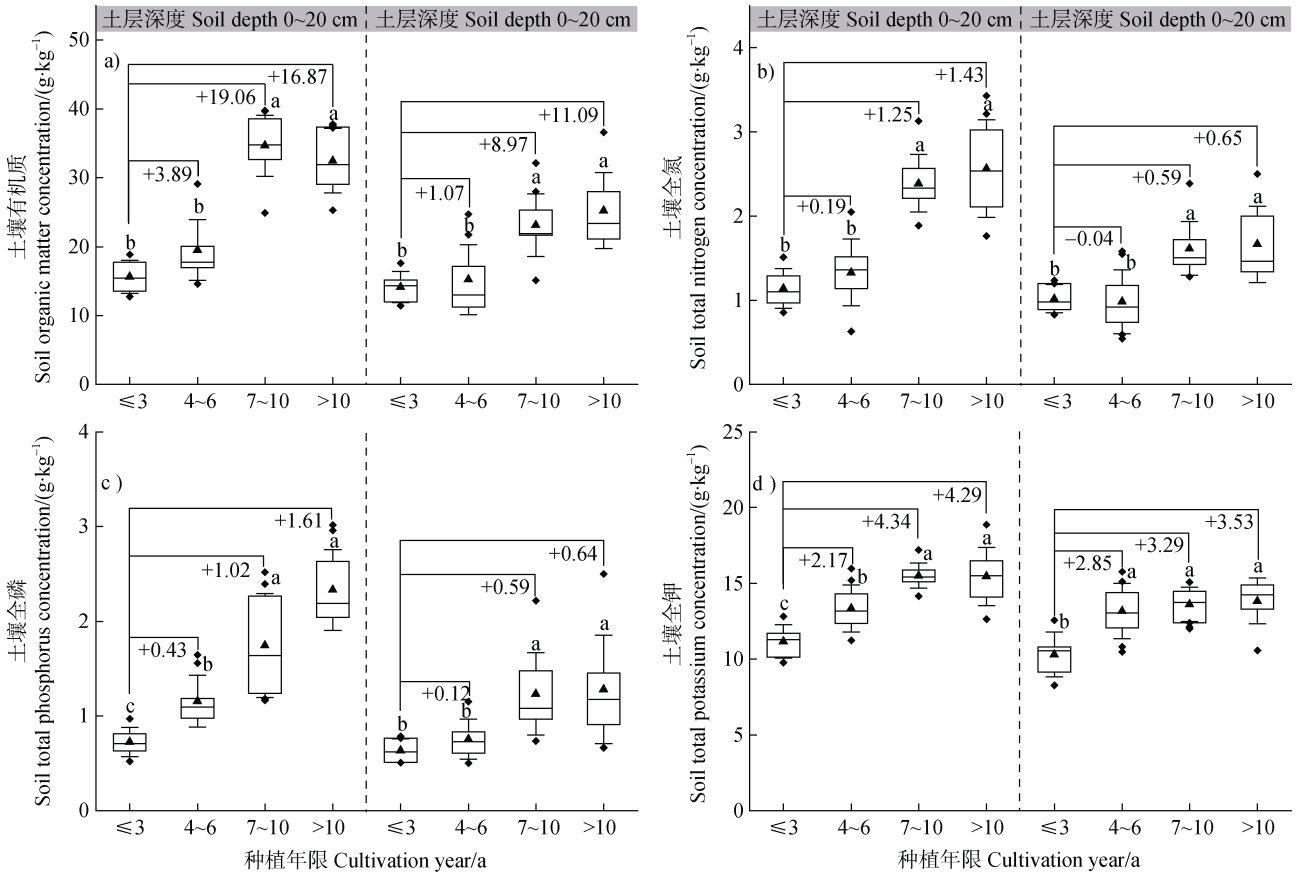


图3 不同种植年限桃园土壤有机质 (a)、全氮 (b)、全磷 (c) 和全钾 (d) 变化特征

Fig. 3 Changes in soil organic matter (a), total nitrogen (b), total phosphorus (c), and total potassium (d) in peach orchard with different cultivation years

1.04~2.68 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 土层土壤全氮含量的变化趋势相对较小, 其变化幅度在 0.69~1.72 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同种植年限土壤全磷含量差异显著 (图 3c), 0~20 cm 土层范围全磷含量在 0.79~2.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 土层土壤全磷含量范围在 0.58~1.44 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 种植 7~10 年及大于 10 年的桃园 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤全磷含量皆达到了 1 级水平。随种植年限的增加, 不同土层土壤全钾含量逐渐增加 (图 3d), 0~20 cm 土层土壤全钾含量范围在 12.0~15.9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 则在 11.2~13.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 属于养分分级中的 2~3 级水平。

2.4 不同种植年限桃园土壤速效养分

桃园土壤速效养分随种植年限的变化如图 4 所示, 速效养分含量随着种植年限的增加不断增加。0~20 cm 土壤碱解氮含量范围在 73.0~225 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 种植大于 10 年的碱解氮含量皆达到了 1 级水平。除种植 3 年以下外, 其他种植年限 0~20 cm 土壤有效磷、速效钾含量均达到了 1 级水平。20~40 cm 土

壤速效养分也表现出随种植年限不断累积的特征, 种植 3 年以下、4~6 年速效养分含量较低, 其碱解氮含量分别为 70.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 99.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷含量 47.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 69.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 536 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 736 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。种植 7~10 年及种植 10 年以上桃园 20~40 cm 土壤速效养分含量较高, 碱解氮含量为 165 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 225 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷含量 148 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 201 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 1 028 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1 065 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其有效磷、速效钾含量均达到了 1 级水平。不同种植年限 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤硝态氮随种植年限的增加不断在土体累积 (图 4d)。在 0~20 cm 土层中, 种植年限 3 年以下土壤硝态氮含量为 16.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 种植 4~6 年、7~10 年、大于 10 年分别增加了 4.65、12.9、15.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 20~40 cm 土层中, 种植 3 年以下土壤硝态氮含量为 14.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 种植 4~6 年、7~10 年、大于 10 年分别增加 3.76、6.91、9.08 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

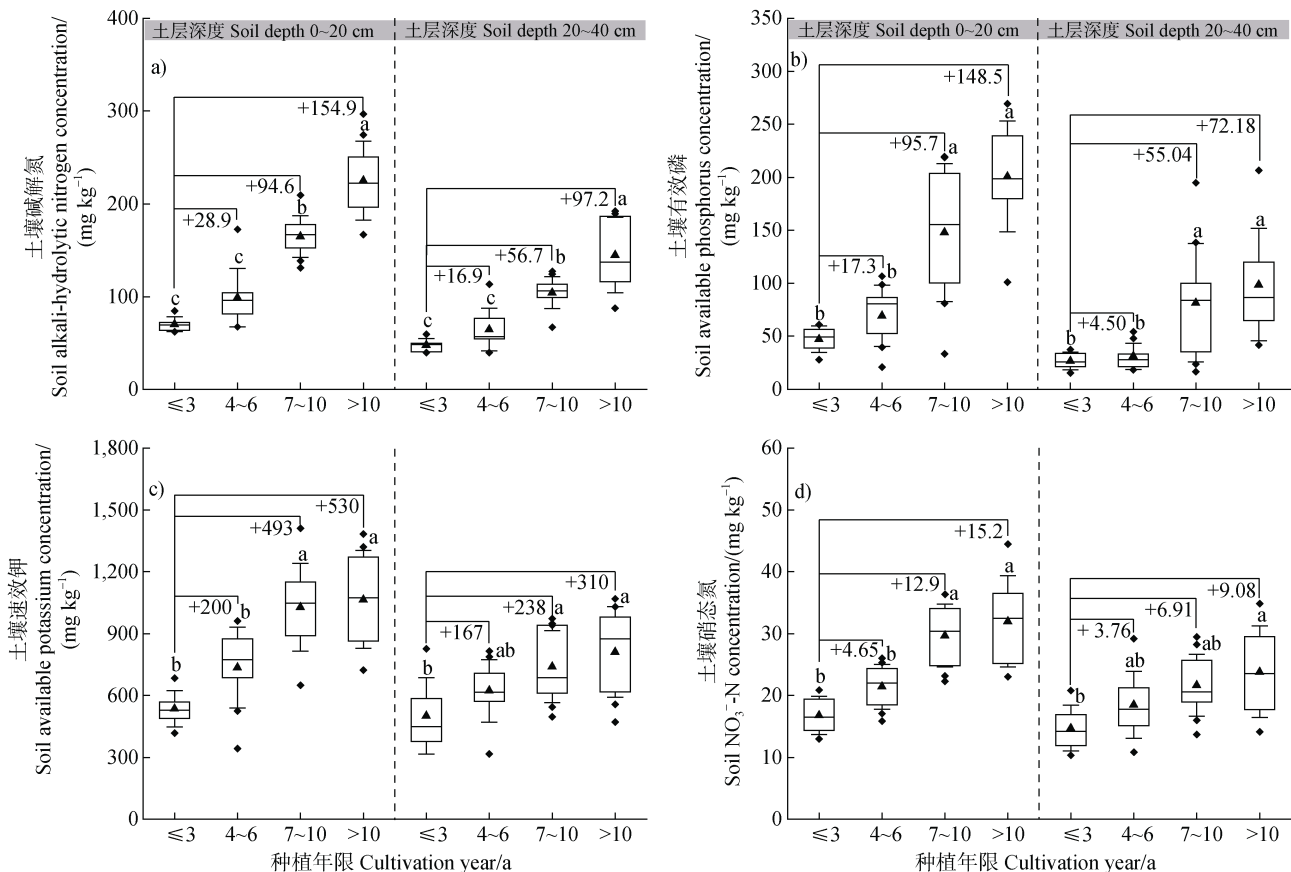


图4 不同种植年限桃园土壤碱解氮 (a)、有效磷 (b)、速效钾 (c) 及硝态氮 (d) 含量变化特征

Fig. 4 Changes in soil alkali-hydrolyzable nitrogen (a), available phosphorus (b), available potassium (c), nitrate nitrogen (d) in peach orchard with different cultivation years

2.5 不同种植年限桃园土壤生态化学计量学特征

生态化学计量学是研究生态系统中能量和元素 (主要是 C、N、P) 平衡的科学^[16], 研究土壤生态化学计量学特征有利于解释 C、N、P 的相互作用及制约关系, 对查明土壤养分状况、限制因素和农田生态系统碳氮循环等具有重要意义。不同种植年限桃园土壤 C、N、P 的生态化学计量比如表 4 所示, 0~20 cm 土壤 C : N、C : P 随着种植年限的增加不断降低, 种植 3 年以下的最高分别为 9.30 和 14.0, 变异系数分别为 8.45% 和 23.8%; 种植大于 10 年最低分别为 7.48 和 8.26, 变异系数分别为 10.7% 和 18.9%, 分别降低了 19.7% 和 41%。20~40 cm 土壤 C : N、C : P 无显著差异, 二者的变化范围分别在 6.43~12.5 和 5.92~22.0。不同种植年限土壤 N : P 无显著差异, 0~20 cm 土壤 N : P 变化范围在 0.73~2.41, 平均值为 1.34, 变异系数为 30.1%。20~40 cm 土壤 N : P 无显著差异, 其变化范围在 0.64~2.32,

平均值为 1.44, 变异系数为 30.7%, 总体趋势表现为随种植年限的增加, N : P 逐渐降低。

2.6 土壤养分与种植年限间的相关性

桃园不同土层土壤 pH、土壤养分和种植年限的相关关系如表 5 所示, 0~20 cm 与 20~40 cm 土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、硝态氮与种植年限之间呈极显著正相关, 随种植年限的增加, 土壤养分不断累积。0~20 cm 土壤 C : N、C : P 与种植年限之间呈极显著负相关, N : P 与种植年限无显著相关关系。20~40 cm 土壤 C : N、C : P、N : P 则与之无显著相关关系。0~20 cm 土壤 C : N 与土壤碱解氮、有效磷、速效钾呈显著负相关关系, 表现为随 0~20 cm 土壤 C : N 的降低, 碱解氮、有效磷、速效钾含量增加。0~20 cm 土壤 C : P 与土壤碱解氮、有效磷分别呈显著和极显著负相关, 表现为随 0~20 cm 土壤 C : P 降低, 碱解氮、有效磷含量增加。

表 4 不同种植年限桃园土壤 C、N、P 的生态化学计量比特征

Table 4 Characteristics of soil C, N, P stoichiometry in peach orchard with different cultivation years

土层深度 Soil depth	种植年限 Cultivation years/a	C : N			C : P			N : P		
		范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV
0~20 cm	≤3	8.61~10.57	9.30a	8.45%	11.35~20.07	13.97a	23.8%	1.24~2.30	1.50a	26.6%
	4~6	7.65~8.89	8.30b	4.80%	6.31~15.46	10.42b	26.7%	0.71~1.87	1.27a	28.7%
	7~10	7.36~9.25	8.45b	7.67%	8.88~17.77	12.45b	30.0%	0.97~2.41	1.48a	32.1%
	>10	6.40~8.45	7.48c	10.7%	5.49~10.09	8.26c	18.9%	0.73~1.56	1.12a	23.0%
20~40 cm	≤3	6.72~10.41	8.16a	17.4%	10.19~18.14	13.18a	20.6%	1.13~2.13	1.65a	25.2%
	4~6	6.43~10.80	8.29a	17.3%	5.92~19.87	12.47a	39.4%	0.64~2.14	1.50a	32.6%
	7~10	6.86~11.75	8.73a	15.3%	8.40~21.99	11.70a	33.7%	0.71~2.32	1.36a	31.8%
	>10	8.49~12.50	9.80a	13.5%	8.48~18.95	12.45a	26.3%	0.68~2.04	1.31a	32.5%

注: 不同小写字母表示同一土层深度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: The different lowercase letters indicate significant differences among treatments with the same soil depth ($P < 0.05$).

表 5 不同种植年限桃园土壤养分与种植年限间的相关系数

Table 5 Correlation analysis of soil nutrients with cultivation years in peach orchard

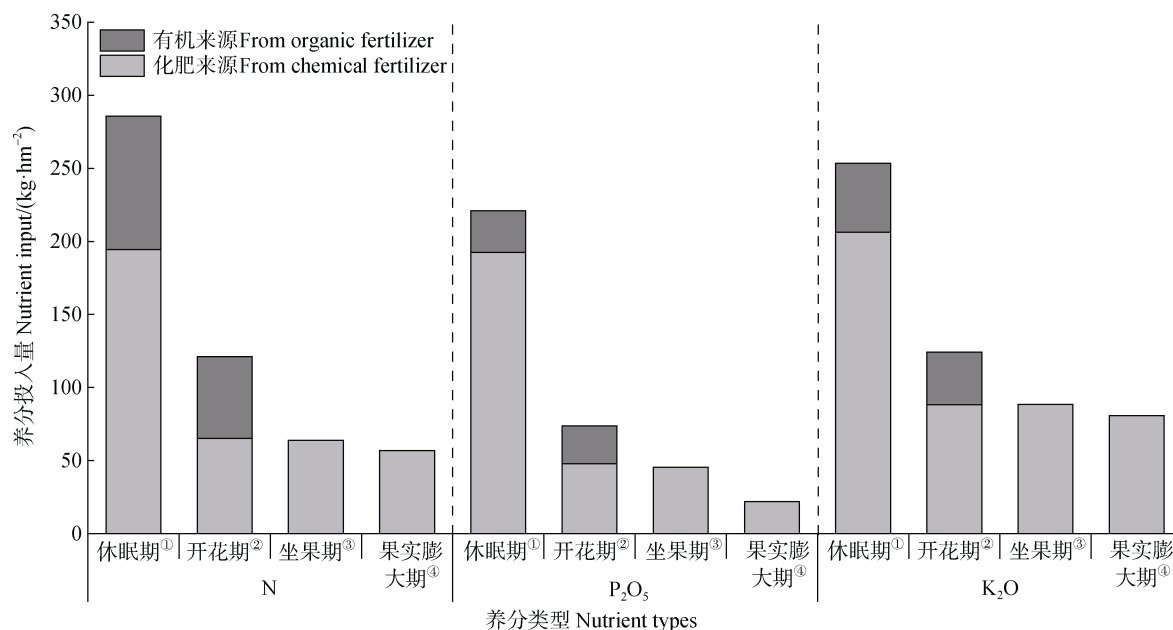
	土层深度 Soil depth 0~20 cm				土层深度 Soil depth 20~40 cm			
	种植年限 Cultivation years	C : N	C : P	N : P	种植年限 Cultivation years	C : N	C : P	N : P
种植年限 Cultivation years	—	-0.603**	-0.493**	-0.309	—	0.352	-0.163	-0.314
SOM	0.746**	-0.375*	-0.061	0.075	0.661**	0.665**	0.078	-0.209
TN	0.795**	-0.621**	-0.113	0.106	0.630**	0.216	0.113	0.025
TP	0.859**	-0.482**	-0.668**	-0.539**	0.585**	0.591**	-0.536**	-0.723**
TK	0.703**	-0.480**	-0.121	0.048	0.497**	0.389*	0.193	-0.010
A-N	0.909**	-0.520**	-0.406*	-0.257	0.830**	0.309	-0.069	-0.187
Olsen-P	0.834**	-0.581**	-0.496**	-0.316	0.637**	0.568**	-0.349*	-0.530**
A-K	0.737**	-0.479**	-0.270	-0.110	0.559**	0.330	-0.219	-0.353*
NO ₃ -N	0.785**	-0.564**	-0.349*	-0.162	0.463**	0.320	0.194	0.026

注: SOM, 土壤有机质; TN, 土壤全氮; TP, 土壤全磷; TK, 土壤全钾; A-N, 碱解氮; Olsen-P, 有效磷; A-K, 速效钾; NO₃-N, 硝态氮; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。Note: SOM, soil organic matter; TN, soil total nitrogen; TP, soil total phosphorus; TK, soil total potassium; A-N, alkali-hydrolyzable nitrogen; Olsen-P, available phosphorus; A-K, available potassium; NO₃-N, nitrate nitrogen.

3 讨论

太湖流域阳山水蜜桃园养分年投入量为 N 527 kg·hm⁻²、P₂O₅ 362 kg·hm⁻²、K₂O 545 kg·hm⁻²,

其中有机养分投入占比仅为 27.8%、15.4%、15.6%, 有机养分占比较低。就不同阶段的养分投入 (图 5) 而言, 有机肥投入的主要时期在果树休眠期和开花期, 采用深施的方法进行有机无机配施, 休眠期和



① Dormant stage; ② Bloom stage; ③ Fruit setting stage; ④ Pit hardening stage.

图5 不同施肥阶段桃园养分投入状况

Fig. 5 Nutrient inputs in the peach orchard at different fertilization stages

开花期的总体投入比例在 1.2 : 1.0 : 1.4 (N : P₂O₅ : K₂O) 左右。坐果期和果实膨大期采用复合肥追肥, 养分投入比例在 1.6 : 1.0 : 2.3 (N : P₂O₅ : K₂O) 左右, 其中氮、钾投入比例增大, 磷投入比例降低, 该阶段正值太湖地区雨季, 果农通常在雨后地表撒施追肥。目前太湖流域桃园养分年投入量远高于桃果生产过程的养分需求量, 其表观盈余量为 N 343 kg·hm⁻²、P₂O₅ 238 kg·hm⁻²、K₂O 240 kg·hm⁻², 且随着种植年限不断增加。未被桃树吸收利用的肥料氮磷钾将在土壤中不断累积, 养分盈余状况越来越严重。过量施肥会对桃园生产带来负面影响, 导致果实产量、品质下降。李付国等^[17]研究表明平谷桃园施肥量高于 150~300 kg·hm⁻² (以 N 计, 下同) 会导致坐果率上升, 单果重下降, 可溶性固形物含量降低。同时长期过量施肥还会导致土壤 pH 下降, 徐仁扣和 Coventry^[18]研究表明, 14 年连续施用铵态氮 80 kg·hm⁻² 就会加速土壤酸化, 土壤 pH 下降 1.4~1.6。太湖流域种植大于 10 年的桃园土壤 pH 为 4.57, 达到了强酸性水平 (4.5 < pH < 5.5), 而该地区稻麦轮作土壤 pH 范围在 5.72~6.52^[19]。由此可见稻改果后过量施肥严重加剧了土壤酸化。

随着种植年限的增加, 太湖流域桃园土壤氮磷钾养分不断累积, 不同种植年限桃园养分表现出强

烈的空间差异 (图 3, 图 4)。种植 3 年以下桃园土壤养分等级均处于 3~4 级, 而 10 年以上的则普遍达到了 2 级及以上水平, 远超过 Xie 等^[20]调查的该地区农田土壤养分水平。随着养分的不断投入, 桃园土壤 C : N、C : P 随种植年限不断降低, 与黄土高原苹果园^[21]、胶东半岛苹果园^[22]的研究结果相似。在桃园的总体养分投入中有机养分比例较小, 导致有机碳在土壤中的累积速度低于氮磷的累积速度, 最终导致 C : N、C : P 随种植年限不断降低。土壤 C : N 是衡量碳氮养分平衡的重要指标, 与有机质的分解速率成反比^[23], 本研究中桃园 C : N 均低于我国土壤平均值 12.3^[24], 表明该地区桃园土壤矿化速率较高。土壤 C : P 被认为是表征土壤微生物矿化或释放环境中有机磷或固定态磷潜力的重要指标, 低 C : P 有利于促进土壤有效磷的增加^[25]。本研究中桃园 C : P 均低于我国土壤平均值 52.7^[24], 表明桃园土壤磷有效性较高。在桃园养分投入中, 氮肥投入量约为磷肥投入量的 1.5 倍, 但其土壤 N : P 却随种植年限不断降低 (表 5), 这可能是由于在湿润气候、地下水位低及酸性土壤条件下, 氮素以气体挥发、淋溶和径流等形式产生大量环境损失, 而磷则固定在土壤中, 导致氮在土壤中的累积速度低于磷的累积速度^[26], 从而造成该结果。桃园土壤

有效磷平均含量达 $97.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其含量过高，远超本课题组研究的太湖流域常熟、宜兴稻田土壤有效磷流失环境阈值 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [27]，存在较大的磷素淋失风险。施肥导致土壤速效钾含量迅速增高，加速土壤钾淋溶 [28]。Liang 等 [29] 研究结果发现土壤速效钾大于 $120 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，土壤钾淋溶风险加剧，同时 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量显著降低，导致土壤颗粒松散、质地黏重。太湖桃园土壤速效钾含量普遍高于 $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，存在较大的土壤钾淋溶和土壤质量恶化风险问题。过量施肥是导致土壤硝态氮累积的重要因素，增加硝态氮淋溶风险 [30]，对地下水水质产生严重影响。Kou 等 [31] 在对过量施肥、集约化蔬菜种植区山东潍坊的研究结果表明，超过 40% 的地下水样本硝态氮严重超标，超过 40% 的地下水样本硝态氮严重超标，其硝态氮来源中，农田施肥贡献最大。本研究中桃园土壤硝态氮含量高达 $19.3\sim 33.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，对周边地下水的污染风险较大。

针对太湖流域地区水蜜桃园养分高投入、氮磷钾盈余等问题，必须提出相应的减肥增效、高产保质方案，以减少环境负荷。在其养分投入中，前期桃树需钾量较低，可以考虑在基肥期减少钾投入。同时，投入的氮素形态以铵态氮为主，在降雨量较大的追肥期进行地表撒施容易产生氨挥发和地表径流损失，可参照休眠期和开花期进行环状沟施，或采用小型机具进行条带深施，以增加肥料利用率。铵态氮易通过硝化作用转化为硝态氮，进而产生 N_2O 、淋溶及径流损失 [32]。硝化抑制剂是抑制土壤硝化过程的重要手段，常用的硝化抑制剂包括双氰胺 (DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐 (DMPP)，可以有效抑制土壤硝化作用，显著降低 N_2O 排放 [33]。但对于硝化抑制剂应用于太湖流域桃园的合适种类、用量、抑制时间及效果等，尚需下一阶段的试验加以验证。果园生草、有机覆盖可有效拦截地表径流，同时减少氮磷养分及土壤流失。王晓荣等 [34] 通过果园生草，显著降低了 30%~90% 的地表径流量和 37%~89% 的径流氮损失。生草覆盖技术应用于太湖流域桃园时，需要注意生草种类的选取以及种植密度等问题。此外，缓控释肥由于其养分释放缓慢，可延长铵态氮的土壤停留时间，增加作物养分吸收，提高肥料利用率，降低当季土壤硝态氮累积量 [35]。同时缓控释肥养分释放时间长，可减少追肥次数，省时省工。最新研发的生物有机无机缓

释肥料具有缓控释肥的特点，但尚需大田验证。也可以通过添加多功能复合微生物菌剂增加土壤养分有效性，促进作物对氮磷钾的吸收，改善土壤理化性质 [36]。以水蜜桃养分吸收规律为依据，优化水蜜桃专用肥料配方，并结合专用小型深施机具进行肥料深施。

目前，太湖桃园养分投入高，盈余严重，亟需从投入源头控制。在果树休眠期和开花期，果树对速效养分需求量较低，可加大有机养分投入比例。对于坐果期与果实膨大期，Chen 等 [37] 认为每阶段的最佳养分投入量为 $\text{N } 32 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 31 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，而太湖地区桃园投入高于其 2 倍之多。综合考虑桃树的养分吸收规律和太湖地区的气候条件，基于目前养分投入状况，各施肥阶段减少 30%~50% 复合肥投入，在休眠期和开花期则设置 50% 有机养分替代；使用前期养分均衡、后期高氮钾比例的复合肥，采用开沟深施技术，配合添加 1% (质量百分比) 硝化抑制剂，增加肥料利用率，减少气态氮损失，同时减少 $2\ 000\sim 5\ 000 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的经济投入。以豆科类植物 (如白三叶) 覆盖代替传统果园清耕管理，进一步拦截地表径流，覆盖植物通过自身固氮作用增加土壤养分，改善土壤质量。

本研究阐明了太湖流域水蜜桃园生产过程中养分投入过量、土壤酸化、养分盈余及累积严重等问题，为其优化施肥提供了基础数据支撑，为阳山水蜜桃绿色生产管理提出了新思路。今后的研究不仅需要注重桃园生产的高产优质，同时应协调削减其生产过程中的环境负荷，针对氮磷流失环境风险采取相应的阻控技术，为太湖流域果园绿色发展提供新思路。

4 结 论

随着种植年限的增加，果树生长需要的养分也越来越多，养分的投入量加大，且化肥占主导地位，导致了土壤养分的盈余显著，土壤酸化的趋势明显。土壤氮磷钾养分不断累积，不同种植年限桃园养分含量表现出强烈的空间异质性， $\text{C}:\text{N}$ 、 $\text{C}:\text{P}$ 随种植年限不断降低。土壤养分累积将加大其径流和淋溶流失的风险，造成水体污染。进一步研究水蜜桃园养分的优化投入和阻控氮磷流失的技术措施是该地区果园可持续管理的重要环节。

参考文献 (References)

- [1] Zhang T, Yang Y, Ni J, et al. Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Areas[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 295: 106919.
- [2] Li C H. The effect of “Ten years of harnessing Taihu Lake” and analysis of variation characteristics of nitrogen and phosphorus pollution in the watershed[N]. *China Environment News*, 2020-07-09(4). [李春华. “十年治太”成效与流域氮磷污染变化特征解析[N]. *中国环境报*, 2020-07-09(4).]
- [3] Zhou Y, Si Y B, Zhao X, 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. [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.]
- [4] Min J, Ji R, Wang X, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1230—1238. [闵炬, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(8): 1230—1238.]
- [5] Cheng Y, Jia Y S, Wang Y, et al. Nutrient inputs and soil fertility status in orchards of Zhushan Bay in Taihu Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1940—1947. [程谊, 贾云生, 汪玉, 等. 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[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(10): 1940—1947.]
- [6] Ji Y, Liu H, Shi Y. Will China’s fertilizer use continue to decline? Evidence from LMDI analysis based on crops, regions and fertilizer types[J]. *PLoS One*, 2020, 15(8): e0237234.
- [7] Wuxi Bureau of Statistics. Wuxi statistical yearbook 2021[M]. Wuxi: Wuxi Bureau of Statistics. 2021. [无锡市统计局. 无锡市统计年鉴 2021[M]. 无锡: 无锡市统计局. 2021.]
- [8] Changzhou Bureau of Statistics. Changzhou statistical yearbook 2021[M]. Changzhou: Changzhou Bureau of Statistics. 2021. [常州市统计局. 常州市统计年鉴 2021[M]. 常州: 常州市统计局. 2021.]
- [9] Suzhou Bureau of Statistics. Suzhou statistical yearbook 2021[M]. Suzhou: Suzhou Bureau of Statistics. 2021. [苏州市统计局. 苏州市统计年鉴 2021[M]. 苏州: 苏州市统计局. 2021.]
- [10] The National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer nutrients[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. [全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.]
- [11] The National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. [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.]
- [12] China Chemical Industry Management Committee. China fertilizer practice book[M]. Beijing: China and International Broadcasting Video Press, 2006. [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.]
- [13] Chen J Z. Fruit culture science (South Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011. [陈杰忠. 果树栽培学各论(南方本)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.]
- [14] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.]
- [15] National Soil Survey Office. The second national soil survey tentative specifications[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979. [全国土壤普查办公室. 第二次全国土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.]
- [16] Austin A T, Vitousek P M. Introduction to a Virtual Special Issue on ecological stoichiometry and global change[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(3): 649—651.
- [17] Li F G, Meng Y H, Jia X H, et al. Effects of nitrogen applied rate on fruit yield, quality and leaf nutrient content of ‘Bayuecui’ peach[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 918—921. [李付国, 孟月华, 贾小红, 等. 供氮水平对“八月脆”桃产量、品质和叶片养分含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 918—921.]
- [18] Xu R K, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5): 385—388. [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.]
- [19] Xie E Z, Zhao Y C, Li H D, et al. Spatio-temporal changes of cropland soil pH in a rapidly industrializing region in the Yangtze River Delta of China, 1980—2015[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 272: 95—104.
- [20] Xie W M, Yu F, Feng X Y, et al. Investigation status of soil fertility and water pollution in representative villages of Taihu Lake watershed rural area[J]. *Soils*, 2014, 46(4): 613—617. [谢文明, 于飞, 冯晓宇, 等. 太湖流域农村地区典型村镇土壤养分和水体污染现状调查[J]. *土壤*, 2014, 46(4): 613—617.]
- [21] Guo H, Liu T P, Du Y F, et al. Spatial variability of soil nutrients in the apple orchards on the scale of county in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water*

- Conservation, 2015, 22 (3): 21—27. [郭宏, 刘天鹏, 杜毅飞, 等. 黄土高原县域苹果园土壤养分空间变异特征研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (3): 21—27.]
- [22] Fu C C, Zhang H B, Tu C, et al. Spatial distribution and dynamics of soil organic carbon and total nitrogen in apple orchards in coastal regions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 857—867. [付传城, 章海波, 涂晨, 等. 滨海苹果园土壤碳氮空间分布及动态变化研究[J]. 土壤学报, 2018, 55 (4): 857—867.]
- [23] Baddeley J A, Edwards A C, Watson C A. Changes in soil C and N stocks and C : N stoichiometry 21years after land use change on an arable mineral topsoil[J]. *Geoderma*, 2017, 303: 19—26.
- [24] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils : A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98 (1): 139—151.
- [25] DeForest J L, Moorhead D L. Effects of elevated pH and phosphorus fertilizer on soil C, N and P enzyme stoichiometry in an acidic mixed mesophytic deciduous forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 150: 107996.
- [26] Tang X, Hu J S, Lu Y, et al. Soil C, N, P stocks and stoichiometry as related to land use types and erosion conditions in lateritic red soil region, South China[J]. *Catena*, 2022, 210: 105888.
- [27] Wang Y, Yuan J H, Chen H, et al. Soil phosphorus pool evolution and environmental risk prediction of paddy soil in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (6): 1640—1649. [汪玉, 袁佳慧, 陈浩, 等. 太湖流域典型农田土壤磷库演变特征及环境风险预测[J]. 土壤学报, 2022, 59 (6): 1640—1649.]
- [28] Lu D, Dong Y, Chen X, et al. Comparison of potential potassium leaching associated with organic and inorganic potassium sources in different arable soils in China[J]. *Pedosphere*, 2022, 32 (2): 330—338.
- [29] Liang X, Rengasamy P, Smernik R, et al. Does the high potassium content in recycled winery wastewater used for irrigation pose risks to soil structural stability?[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106422.
- [30] Lu J, Bai Z, Velthof G L, et al. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 407—415.
- [31] Kou X, Ding J, Li Y, et al. Tracing nitrate sources in the groundwater of an intensive agricultural region[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 250: 106826.
- [32] Wang H T, Köbke S, Dittert K. Use of urease and nitrification inhibitors to reduce gaseous nitrogen emissions from fertilizers containing ammonium nitrate and urea[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e00933.
- [33] Zhou X, Wang S W, Ma S T, et al. Effects of commonly used nitrification inhibitors-dicyandiamide (DCD), 3, 4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP), and nitrapyrin on soil nitrogen dynamics and nitrifiers in three typical paddy soils[J]. *Geoderma*, 2020, 380: 114637.
- [34] Wang X R, Tang W P, Fu T, et al. Effects of different management practices on soil nutrient and nitrogen and phosphorus losses with runoff of citrus orchard in the Three Gorges reservoir area[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37 (11): 95—102. [王晓荣, 唐万鹏, 付甜, 等. 不同管理措施对三峡库区柑橘园土壤养分和径流氮磷流失的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37 (11): 95—102.]
- [35] Zhao S Y, Wang S L, Zheng X L, et al. Effects of slow/controlled release fertilizers on winter-wheat yield, nitrogen utilization efficiency and soil nitrate distribution[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23 (10): 78—82, 90. [赵思远, 王松禄, 郑西来, 等. 缓/控释肥料对冬小麦产量、氮素利用及土壤硝态氮分布的影响[J]. 安徽农学通报, 2017, 23 (10): 78—82, 90.]
- [36] Wang H B. Effect of biological-organic complex fertilizer on the yield, quality and soil properties of vegetables[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. [王海滨. 生物有机无机复合肥对蔬菜产量、品质及土壤性质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.]
- [37] Chen Y T, Hu S Y, Guo Z G, et al. Effect of balanced nutrient fertilizer: A case study in Pinggu District, Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142069.

(责任编辑: 陈荣府)