

太湖流域典型桃园土壤氮素径流流失特征

郭智, 刘红江, 陈留根, 郑建初

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

摘要: 为探索协调水蜜桃优质高产与桃园养分合理投入的技术途径, 以12年生晚湖景桃树为供试材料, 通过野外大田小区试验(2012—2013年), 研究了自然降雨条件下不同施肥及桃园管理模式对太湖流域典型水蜜桃园土壤氮素径流流失特征的影响。结果表明: 农户习惯性施肥(T1)条件下, 径流水TN浓度最高达87.72 mg/L, 且随生育期呈现总体降低趋势。减量施肥(T2)和生草模式(T3)显著降低全生育期内11次径流过程的平均TN浓度, 且分别达26.16%和12.89%。桃园全生育期径流水TN流失总量达52.06 kg/hm², 径流流失率达6.21%, 主要分布于桃果座果期到果实成熟期和果实采收后的强台风季。生草模式(T3)显著降低TN径流流失量和流失率, 且分别达7.41%和7.41%, 减量施肥(T2)处理显著减少TN径流流失量, 达26.96%, 而流失率却增加3.99%, 处理间差异不显著。同时, 生草模式(T3)和减量施肥(T2)处理均可显著降低桃园土壤氮素偏流失率, 降幅分别达9.51%和20.70%。

关键词: 氮; 桃园; 地表径流; 白三叶草

中图分类号:S158; S662.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2017)04-0001-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.001

Characteristics of Nitrogen Losses by Surface Runoff in a Typical Peach Orchard Field in Taihu Lake Basin, China

GUO Zhi, LIU Hongjiang, CHEN Liugen, ZHENG Jianchu

(Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: Within an orchard containing 12-year-old late-maturing peach trees (cultivar “Hujing”) in Taihu Lake Basin, China, different fertilizer application rates and management practices were applied to explore the technological approaches to coordinate high quality and high yield of peach during 2012—2013. The effects of these treatments on soil nitrogen loss by surface runoff in the typical peach orchard were investigated under natural rainfall conditions. In T1 (conventional fertilization practice), total nitrogen concentration (TN) in the surface runoff water reached the peak value of 87.72 mg/L, and TN showed a decreasing trend with the peach growth period. Compared with T1, T2 (reducing fertilization practice to 70% of conventional) and T3 (Inter-planting white clover (*Trifolium repens* L.)) significantly reduced the average TN in whole peach growth period, which decreased by 26.16% and 12.89%, respectively. In T1, the quantity and coefficient of TN losses by surface runoff reached up to 52.06 kg/hm² and 6.21%, respectively; these mainly occurred from the peach fruit setting stage to the peach fruit ripening stage, and the strong typhoon season after peach fruit harvest. Compared with T1, T3 significantly reduced the quantity and coefficient of TN losses by 7.41% and 7.41%, respectively. T2 significantly reduced the quantity of TN losses by 26.96%, but TN loss coefficient slightly increased by 3.99%. Furthermore, compared with T1, T3 and T2 significantly reduced the partial coefficient of TN losses by surface runoff by 9.51% and 20.70%, respectively.

Keywords: nitrogen; peach orchard; surface runoff; white clover (*Trifolium repens* L.)

我国是世界上最主要的桃果生产国。据统计, 2008年我国桃栽培面积达 7.8×10^5 hm², 约占世界总栽培面积的48.7%, 桃果产量达 8.3×10^6 t, 约占

世界总产量的46.2%^[1]。然而, 桃果生产过程中普遍存在氮、磷养分持续过量投入等不合理现象^[2]。据调查, 我国桃园氮素投入量较低的陕西省达337.5

kg/hm², 投入量最高的北京市高达 1 132.3 kg/hm², 各地桃园氮素投入量平均达 650.0 kg/hm²^[3]。另外, 本课题组前期调查发现, 太湖流域水蜜桃园氮素周年投入量达 838.65~853.95 kg/hm²^[4], 远高于桃园适宜氮素投入量(100~200 kg/hm²)^[5-6]。相关研究发现, 果园氮素盈余及负荷与氮素投入量之间呈极显著正相关关系, 而肥料的过量施用是氮素盈余量及负荷增加的主要原因^[7], 果园土壤氮素盈余量的增加势必增加其通过地表径流或地下淋溶等途径向地表水体排放的潜在风险。

众所周知, 氮含量过高是导致水体富营养化的主要原因之一, 而农田氮流失是其重要面源污染源之一^[8]。农业面源排放氮素对太湖水体的贡献率达 37.5%, 其中农田氮素流失量对面源污染贡献率达 60% 以上^[9]; 太湖流域果、菜、花农田面积虽小, 约占总面积的 15%~35%, 但是对流域水体富营养化的贡献率却接近占农田总面积 70% 的大田作物^[10]。由此可见, 该流域中单位面积果菜花农田养分径流流失

量远高于大田作物, 系统研究该类土地利用方式下农田土壤养分径流流失特征及控制技术具有重要意义。截至目前, 鲜有关于太湖流域水蜜桃园土壤氮素径流损失特征及其与降雨等环境因子关系的相关报道, 本研究以该流域典型桃园为研究对象, 通过大田小区定位试验, 系统研究了桃园氮素投入、氮素径流损失特征及其减排技术, 以期为探索协调水蜜桃优质高产与桃园养分合理投入的技术途径, 为实现太湖流域桃园可持续发展提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设于江苏省无锡市惠山区洛社镇杨市润杨村桃园(31°37'N, 120°07'E), 属北亚热带湿润季风气候区, 年均气温约 16 ℃, 年均日照约 2 000 h, 年降水量 1 100~1 200 mm, 年无霜期约 230 d。供试桃树品种为晚湖景, 树龄 12 年, 株行距为 4 m×4 m。试验桃园土壤为黄泥土, 质地偏砂, 其土壤基本理化性状见表 1。

表 1 供试桃园土壤基本理化性状

土层 深度/cm	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—10	4.44	36.78	2.96	0.35	151.95	121.78	739.27
10—20	4.74	24.39	1.89	0.31	125.13	61.38	639.46

1.2 试验设计

结合当地桃园生产实际, 本试验设 3 个处理, 分别为:

(1) 农户习惯性施肥(T1), 基于当地桃农生产习惯的施肥模式与田间管理模式。同时, 据前期调查统计^[4,11-12], 桃园周年氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)养分投入量分别为 838.65, 290.70, 357.90 kg/hm²;

(2) 减量施肥(T2), 在农户习惯性施肥的基础上, 保持肥料投入种类不变, 微肥(硅钙镁钾肥等)与农户习惯性施肥处理中施用量相同, 而其他肥料均减量施用约 30%, 氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)养分投入量分别为 589.05, 203.85, 264.30 kg/hm², 田间管理措施均与农户习惯性施肥处理相同;

(3) 桃园生草(T3), 在桃园种植适宜于当地气候特点的白三叶草(*Trifolium repens* L.), 于 2012 年 11 月 9 日播种, 播种量为 120 kg/hm², 播种方式为撒播, 施肥量、施肥方式及其他田间管理措施均与农户习惯性施肥处理保持一致。

根据桃园现有生产情况, 选择临近排水沟定植的 3 行×1 株为一个小区, 小区面积为 48 m²(12 m×4 m), 设置以上 3 个处理, 3 次重复。试验小区并排随机排列, 小区之间以排水沟分隔, 宽约 30 cm, 小区其他三侧均以宽 20 cm 的土埂分隔, 土埂覆盖双层塑料

膜, 埋深 60 cm, 防止小区间发生水分和养分的交换。田间小区及样品采集设施具体情况详见文献[12]。

1.3 样品采集与分析

降雨期间记录当地降雨量。参照本课题组前期授权发明专利(ZL 201510338696.3)和文献[12]中介绍方法计量径流水量, 并采集径流水样。每个处理至少采集径流水样 500 mL, 带回实验室利用全自动流动分析仪(SKALAR San⁺⁺)及时测定径流水中总氮(TN)含量。

供试土壤 pH 用 PHS-3C 型 pH 计测定^[13]; 全 N、全 P、速效 N、速效 P、速效 K 及有机质含量等参照鲍士旦主编的土壤农化分析中的方法测定^[14]。

1.4 数据分析

(1) 地表径流氮素流失总量。地表径流氮素流失总量(Q)计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i \times 10^{-3}$$

式中: Q 为不同处理条件下桃园地表径流氮素流失总量(kg/hm²); C_i 为每次径流过程中径流水氮素浓度(mg/L); V_i 为每次径流过程中径流水量(m³/hm²)。

(2) 氮素径流流失率。氮素径流流失率(P_i)计算公式为:

$$P_i = \frac{Q}{Q_n} \times 100\%$$

式中: P_i 为各处理条件下桃园氮素地表径流流失率; Q 为各处理条件下桃园氮素地表径流流失量($T1-T3, \text{kg}/\text{hm}^2$); Q_n 为各处理条件下桃园氮素投入量($T1-T3, \text{kg}/\text{hm}^2$)。

(3) 氮素径流偏流失率。本研究中将桃园生产每千克桃果的氮素径流流失量定义为氮素径流偏流失率,计算公式为:

$$P_n = \frac{Q}{Y} \times 1000$$

式中: P_n 为各处理条件下桃园氮素径流偏流失率(g/kg); Q 为各处理条件下桃园氮素地表径流流失量($T1-T3, \text{kg}/\text{hm}^2$); Y 为各处理条件下桃果产量($T1-T3, \text{kg}/\text{hm}^2$)。

用 Excel 2010 和 SPSS 13.0 软件进行数据处理,文中所列数据均为 3 次重复平均值,各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法,凡超过 $LSD_{0.05}$ 水平时视为差异显著。

2 结果与分析

2.1 桃园土壤氮素径流流失浓度变化规律

由图 1 可知,太湖流域典型桃园径流氮素浓度随生育期而呈现总体降低趋势。2012 年 12 月 26 日径流过程中 TN 浓度最高,显著高于其他 10 次径流($p<0.05$)。农户习惯性施肥(T1)条件下,径流 TN 浓度高达 87.72 mg/L。同时,与 T1 相比,减量施肥(T2)和生草模式(T3)处理条件下,全生育期内 11 次径流过程平均 TN 浓度降低 26.16% 和 12.89%($p<0.05$)。

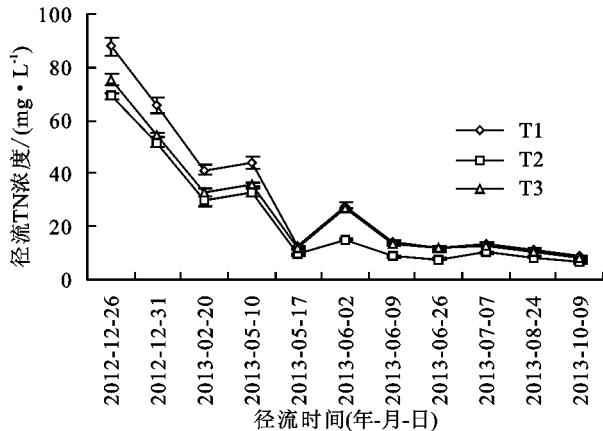


图 1 桃园土壤氮素径流流失浓度变化规律

表 2 桃园土壤氮素径流流失量与降雨量及径流量的相关性

2.2 桃园土壤氮素径流流失量变化规律

由图 2 可以看出,桃园土壤全氮(TN)径流流失主要分布于桃果座果期到果实成熟期(2013 年 5 月 17 日、6 月 9 日、6 月 26 日和 7 月 7 日 4 次径流过程)和果实采收后的强台风季(2013 年 10 月 9 日)。T1 处理条件下,这些径流过程 TN 径流流失量占水蜜桃全生育期径流 TN 流失总量的 62.36%。同时,桃树越冬期氮素流失量也较大,2012 年 12 月 26 日和 12 月 31 日两次径流过程中氮素流失量占水蜜桃全生育期径流水 TN 总流失量的 18.73%,主要归因于此时氮素径流流失浓度极高(两次径流过程氮素浓度分别高达 87.72,65.50 mg/L)。

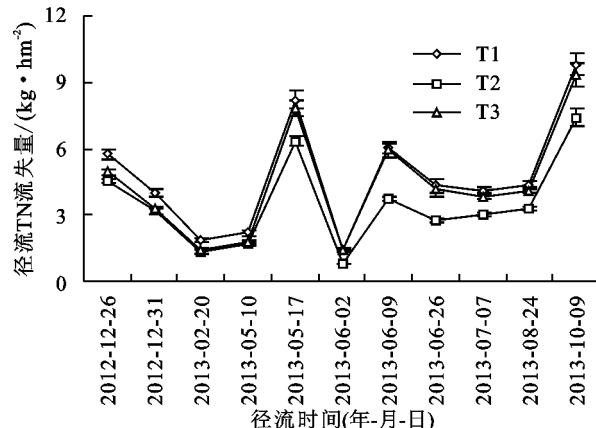


图 2 桃园土壤氮素径流流失量变化规律

2.3 桃园土壤氮素径流流失量与降雨量及径流量的相关性分析

降雨是农田地表径流的主要驱动力,而径流量是养分径流流失的主要构成要素之一。通过相关性分析(表 2)发现,桃园土壤氮素径流流失量与单次降雨过程降雨量呈显著线性正相关关系。T1、T2 和 T3 条件下,氮素径流流失量与降雨量之间的相关方程分别为 $y = 0.0611x + 0.7116 (R^2 = 0.7807)$ 、 $y = 0.0462x + 0.4137 (R^2 = 0.7403)$ 和 $y = 0.0609x + 0.3756 (R^2 = 0.8116)$ 。同样,氮素径流流失量与单次径流事件桃园径流量也呈显著线性正相关关系,各处理条件下,其相关方程分别为 $y = 0.0068x + 2.5545 (R^2 = 0.7716)$ 、 $y = 0.0051x + 1.8281 (R^2 = 0.7143)$ 和 $y = 0.0068x + 2.1876 (R^2 = 0.8200)$ 。

2.4 桃园土壤氮素周年径流流失总量及流失率

由表 3 可知,桃园全生育期径流 TN 流失总量由高

到低依次为 T1、T3 和 T2,流失量分别达 52.06,48.20,38.02 kg/hm²。较 T1 处理而言,T3 和 T2 处理减少 TN

项目	氮素径流流失量/(kg·hm ⁻²)					
	T1		T2		T3	
相关方程	R ²	相关方程	R ²	相关方程	R ²	
降雨量/mm ^[12]	$y = 0.0611x + 0.7116$	0.7807	$y = 0.0462x + 0.4137$	0.7403	$y = 0.0609x + 0.3756$	0.8116
径流量/(m ³ ·hm ⁻²) ^[12]	$y = 0.0068x + 2.5545$	0.7716	$y = 0.0051x + 1.8281$	0.7143	$y = 0.0068x + 2.1876$	0.8200

径流流失量分别达 7.41% 和 26.96% ($p < 0.05$)。

同时,由表 3 可以看出,桃园全生育期 TN 径流流失率由高到低依次为 T2、T1 和 T3,流失率分别达 6.45%, 6.21% 和 5.75%。较 T1 处理而言, T3 处理显著减少 TN 径流流失率达 7.41% ($p < 0.05$), 而 T2 处理则增加 3.99%, 但处理间差异不显著。

同时,由表 3 可知, T1 条件下太湖流域桃园氮素偏流失率达 1.33 g/kg; T3 和 T2 处理显著降低桃园土壤氮素偏流失率分别达 9.51% 和 20.70% ($p < 0.05$)。

表 3 桃园土壤氮素周年径流流失总量及流失率

处理	氮素径流	氮素径流	氮素径流	收入项		支出项	氮素	
	流失总量/ (kg · hm ⁻²)	流失率/%	偏流失率/ (g · kg ⁻¹)	肥料投入	降雨	径流	果实	平衡
T1	52.06 ± 2.47	6.21 ± 0.29	1.33 ± 0.06					
T2	38.02 ± 1.36	6.45 ± 0.23	1.05 ± 0.04					
T3	48.20 ± 2.27	5.75 ± 0.27	1.20 ± 0.06					

3 讨论

根据桃树需肥特性^[15] 和桃果产量^[4] 进行折算, 太湖流域高产桃园理论需氮量仅约 194.94 kg/hm²。然而, 供试桃园氮素周年投入量高达理论需氮量的 4.30 倍, 这势必导致桃园土壤氮素盈余量和流失潜能的急剧增加。本研究中, 在未考虑修剪果枝、烂果带走氮、氨挥发及氧化亚氮排放、桃树树体贮藏等氮素支出项的情况下, 从氮素平衡角度考量(表 4), 太湖流域典型桃园土壤氮素年盈余量约 726.46 kg/hm²。从表 4 可知, 本研究中, 桃园氮素盈余量较全国平均水平高 74.42%, 高达全国最低水平上海区域的 8.47 倍。因此, 太湖流域典型桃园土壤氮素盈余处于高环境风险水平 ($> 200 \text{ kg/hm}^2$)^[3]。桃园土壤氮素盈余量的增加势必增加其通过地表径流等途径向地表水体排放的潜在风险。本研究发现, 桃树生育期内, 桃园土壤氮素径流浓度高达 8.75~87.72 mg/L, 极显著高于我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中规定的 V 类水标准。然而, 径流水在向农田周边湖泊等水体输移过程中, 径流排水中氮素在排水沟渠中经过水生植物、微生物和底泥等共同作用而发生矿(氨)化作用、硝化与反硝化作用、植物吸收和底泥吸附作用等一系列物理化学反应, 其浓度会极显著降低^[16], 进而降低其环境风险。然而, 这种自然输移过程中的阻控/降解作用或效果及其具体机制需要进一步研究。同时, 本研究发现, 桃园径流氮素流失量占当年氮素投入量的比例(径流流失率)达 6.21%, 与太湖地区稻麦轮作农田养分氮素损失比例基本相当(约 6.4%); 然而, 桃园土壤氮素径流排放净负荷却显著高于稻麦轮作农田 (34.1 kg/hm²)^[17],

这与农田氮素投入量密切相关。同时, 桃园土壤氮素径流排放主要集中在桃果座果期至成熟期, 考虑到农田养分流失对周边水环境的负面影响, 应加强这一时期径流养分的监控、拦截和阻断工程的配套研究。

表 4 不同区域桃园土壤氮素氮素平衡状况比较

单位: kg/hm²

不同区域桃园	收入项		支出项		氮素平衡
	肥料投入	降雨	径流	果实	
太湖流域(供试桃园)	838.65	22.37	52.06	82.50	726.46
河北 ^[3]	1045.50	—	—	200.00	845.50
上海 ^[3]	203.70	—	—	117.90	85.80
全国平均 ^[3]	587.00	—	—	170.50	416.50

果园生草是在果树行间或全园种植多年生草本植物作为覆盖物的一种果园管理方法, 在欧美及日本等发达国家普遍推行, 取得了良好的生态和经济效益^[18]。然而, 由于我国长期受大田“除草务尽”、“与果争肥水”等传统思想影响, 果园生草制一直未得到很好的推广应用, 目前实施生草的果园面积仍不足总面积的 20%^[19]。近年来, 广大科技工作者将其作为一项减轻农田面源污染的技术途径而进行试验, 也取得了初步积极成效。研究报道^[20], 常规管理措施下, 太湖流域河网平原梨园全年地表径流氮素损失 13.45 kg/hm², 而采用生物措施(沿沟种植黑麦草)可使总氮流失显著减少 23.57%。俞巧钢等^[21]发现, 种植绿肥作物黑麦草、紫云英和箭舌豌豆能使山地桃园总氮径流流失分别减少 55.2%, 49.3% 和 18.7%。同时, 程谊等^[22]通过短期监测发现, 太湖流域水蜜桃园生草处理可以有效降低径流水氮、磷浓度。本研究也发现, 生草管理可以显著降低水蜜桃园土壤氮素径流浓度和周年流失量分别达 12.89% 和 7.41%, 这与前人研究结果基本一致。究其原因, 果园生草能显著减少径流侵蚀泥沙流失, 而其正是果园氮素流失的主要途径之一^[20-21]。同时, 植被覆盖度也是影响农田养分径流流失的重要影响因素之一^[23-24], 果园生草显著改善果园地表覆盖状况, 这也是果园生草后土壤氮素径流损失减少的可能原因之一, 具体机制有待进一步深入研究。同时, 课题组前期研究也表明, 桃园生草管理具有显著减少土壤磷素径流损失、提高桃果产量并改善桃果品质等优势^[12]。可见, 桃园生草具有土壤氮磷减排和增产提质的双重作用, 可作为一项太湖流域集约桃园的可持续生产技术进行大面积推广应用。

4 结论

(1) 太湖流域典型桃园径流水氮素浓度随生育期呈现总体降低趋势。农户习惯性施肥条件下, 径流水 TN 浓度最高达 87.72 mg/L。减量施肥和生草模式

可显著降低径流水 TN 浓度,全生育期内 11 次径流过程平均 TN 浓度降低 26.16% 和 12.89%。

(2) 农户习惯性施肥条件下,桃园全生育期径流水 TN 流失总量达 $52.06 \text{ kg}/\text{hm}^2$,且主要分布于桃果座果期到果实成熟期和果实采收后的强台风季。生草模式和减量施肥处理可显著降低氮素径流流失量达 7.41% 和 26.96%。同时,桃园土壤氮素径流流失量与降雨量和径流水量均呈显著线性正相关关系。

(3) 农户习惯性施肥条件下,桃园土壤氮素径流流失率达 6.21%,氮素偏流失率达 $1.33\text{g}/\text{kg}$ 。生草模式处理可显著降低氮素径流流失率和偏流失率分别达 7.41% 和 9.51%。减量施肥条件下,氮素径流流失率稍增 3.99%,偏流失率显著降低 20.70%。

参考文献:

- [1] 陈昌文,曹珂,王力荣,等.中国桃主要品种资源及其野生近缘种的分子身份证构建[J].中国农业科学,2011,44(10):2081-2093.
- [2] 卢树昌.我国集约化果园养分投入特征及其对土壤质量的影响[D].北京:中国农业大学,2009.
- [3] 卢树昌.果园土壤质量状况与提升[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [4] 郭智,周炜,陈留根,等.太湖流域典型桃园氮素投入特征及其对桃果产量的影响[J].江苏农业科学,2015,43(11):204-207.
- [5] 刘夏石.计算施肥学与理性农业的探索[M].南京:东南大学出版社,2003.
- [6] 孟月华,李付国,贾小红,等.平谷桃园养分管理现状及其问题分析[J].中国土壤与肥料,2006(6):54-56.
- [7] 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.
- [8] Boesch D F, Brinsfield R B, Magnien R E. Chesapeake bay eutrophication: Scientific understanding, ecosystem restoration, and challenges for agriculture[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 30(2):303-320.
- [9] 金相灿,叶春,颜昌宙,等.太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J].环境科学研究,1999,12(5):1-5.
- [10] 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.
- [11] 郭智,周炜,陈留根,等.太湖流域桃园磷钾投入特征及其对果实品质的影响[J].中国南方果树,2015,44(6):112-117.
- [12] Guo Z, Liu H J, Zhou W, et al. Characteristics of phosphorus losses due to surface runoff in a peach orchard and the effects of inter-planting white clover (*Trifolium repens* L.) on fruit yield and quality[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2016, 25(12):5516-5527.
- [13] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第 3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [15] Drahorad W. Modern guidelines on fruit tree nutrition [J]. The Compact Fruit Tree, 1999, 32(3):91-97.
- [16] 李强坤,胡亚伟,孙娟.农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J].中国生态农业学报,2010,18(1):210-214.
- [17] 吴永红,胡正义,杨林章.农业面源污染控制工程的“减源—拦截—修复”(3R)理论与实践[J].农业工程学报,2011,27(5):1-6.
- [18] Greenham D W P. The environment of the fruit tree Managing fruit soils[J]. HortScience, 1995, 12:25-31.
- [19] 吕德国,秦嗣军,杜国栋,等.果园生草的生理生态效应研究与应用[J].沈阳农业大学学报,2012,43(2):131-136.
- [20] 张慧敏,徐秋桐,章明奎.水土保持措施降低河网平原区果园地表氮磷铜流失[J].农业工程学报,2014,30(2):132-138.
- [21] 俞巧钢,叶静,马军伟,等.山地果园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):6-10,20.
- [22] 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.
- [23] Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, et al. Dynamics of soil erosion rates and controlling factors in the Northern Ethiopian highlands-towards a sediment budget [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(5):695-711.
- [24] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110(3):34-40.