

果园面源污染来源和迁移特征及影响因素研究进展

熊丽君¹, 殷硕², 朱陈乐³

(1.上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2.上海师范大学

生命科学学院, 上海 201418; 3.上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: [目的] 探明果园面源污染的来源、迁移特征及影响因素, 为科学防控果园面源污染、改善土壤及水环境质量提供理论依据。[方法] 基于国内外最新研究成果, 分析果园氮磷、重金属、农药等污染物来源、迁移特征及影响因素, 剖析现有研究不足, 提出未来研究方向。[结果] ① 果园肥料氮施用强度 $[565 \sim 1071.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、氮磷流失系数总体高于农田, 氮磷易在坡地果园坡底累积, 在土壤中空间变异性高于农田和茶园。② 在果园未被污水灌溉、周边无工业活动情况下, 施用的肥料和农药及交通活动是果园土壤重金属的主要来源, 重金属在土壤剖面迁移范围约在 $0.005 \sim 0.8 \text{ m}$ 。③ 果园苯并咪唑类、除虫菊酯类农药用量分别约为 $450 \sim 4050 \text{ g}/\text{hm}^2$, $60 \sim 150 \text{ g}/\text{hm}^2$, 弱吸附性农药施用后受短期降雨影响大, 中等吸附性农药受到降雨和蒸发双重影响, 河流中农药含量呈现与降雨相关的季节性。④ 控制果园面源污染应优先处理初期径流, 有效截留泥沙。林下生草可削减径流 $7.1\% \sim 98.7\%$, 控制泥沙 $15.7\% \sim 99.8\%$, 截留氮、磷分别为 $4.6\% \sim 98.5\%$ 和 $15.3\% \sim 96.6\%$, 削减重金属 $18.8\% \sim 90.1\%$ 。⑤ 果园面源污染迁移特征与降雨时空分布一致, 20% 地表径流约输出 50% 以上污染负荷, 极端降雨下果园径流系数、氮磷流失为普通降雨的 2.6 和 11.5 倍, 降雨量、降雨强度是影响重金属和农药迁移的主要因素, 在持续时间长, 强度中等的降雨模式下, 重金属和农药更容易下渗和往下游迁移。[结论] 国内果园精细化管理尚在起步阶段, 未来有待探明复杂因素影响下果园面源氮磷、重金属、农药等污染的迁移规律, 精准识别面源污染影响时空范围与程度, 科学阻控面源污染, 在保障果品前提下有效减少面源污染流失, 提升果园生态效益, 降低环境风险。

关键词: 果园; 面源污染; 迁移特征; 影响因素; 耕作方式; 降雨特征

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2024)04-0416-13

中图分类号: X713

文献参数: 熊丽君, 殷硕, 朱陈乐. 果园面源污染来源和迁移特征及影响因素研究进展[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 416-428. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.042; Xiong Lijun, Yin Shuo, Zhu Chenle. Research progress on sources, migration characteristics, and influencing factors of non-point source pollution from orchards [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 416-428.

Research Progress on Sources, Migration Characteristics, and Influencing Factors of Non-Point Source Pollution from Orchards

Xiong Lijun¹, Yin Shuo², Zhu Chenle³

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China;

2. College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: [Objective] The sources, migration characteristics, and influencing factors of non-point source pollution in orchards were analysed in order to provide theoretical support for scientifically aid in preventing and controlling non-point source pollution from orchards and improving the quality of soil and water environments. [Methods] Based on the latest research results (both domestically and abroad), the source, migration characteristics, and influencing factors of pollution by nitrogen, phosphorus, heavy metals, and pesticides in orchards were analysed. Existing research deficiencies were analysed and future research directions were proposed. [Results] ① The application intensities of nitrogen fertiliser in orchards $[565 \sim$

收稿日期: 2023-11-21

修回日期: 2024-02-26

资助项目: 上海市科技兴农项目“上海市果园面源特征模拟与防控技术研究”(2022-02-08-00-12-F01095); 国家自然科学基金项目(51979168)

第一作者: 熊丽君(1977—), 女(汉族), 江苏省靖江市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源及面源污染模拟、低影响开发、生态环境规划等研究。Email: xionglj@saes.sh.cn.

1 071.2 kg/(hm² · a)] and loss coefficients of nitrogen and phosphorus were generally higher than those in farmland. Nitrogen and phosphorus accumulated easily at the bottom of the orchard slope, and their spatial variabilities in soil were higher than those in the farmland and tea gardens. ② When the orchards were not irrigated by sewage and industrial activities were absent, fertilisers, pesticides, and traffic activities were the main sources of heavy metals in the orchard soil, and the migration ranges of heavy metals in the soil profile were approximately 0.005—0.8 m. ③ The dosages of benzimidazole and pyrethroid pesticides in orchards were approximately 40—4 050 and 60—150 g/hm², respectively. After application, weakly adsorbed pesticides were significantly affected by short-term rainfall, whereas moderately adsorbed pesticides were affected by rainfall and evaporation. The pesticide content in the river showed a seasonal correlation with rainfall. ④ To control non-point source pollution in orchards, the treatment of initial runoff must be prioritised to effectively intercept the sediment. Planting grasses under fruit trees can reduce runoff by 7.1%—98.7%, control sediments by 15.7%—99.8%, intercept nitrogen and phosphorus by 4.6%—98.5 and 15.3%—96.6%, respectively, and reduce heavy metals by 18.8%—90.1%. ⑤ The migration characteristics of non-point source pollution from orchards were consistent with the temporal and spatial distributions of rainfall. In particular, 20% of the surface runoff produced more than 50% of the pollution load. Under extreme rainfall, the runoff coefficients and loss loads of nitrogen and phosphorus in orchards were 2.6 and 11.5 fold higher than those under normal rainfall. Rainfall volume and intensity were the main factors affecting the migration of heavy metals and pesticides. Under rainfall with long duration and moderate intensity, heavy metals and pesticides were more likely to infiltrate and migrate downstream. [Conclusion] The management of orchards in China is still in its infancy. In the future, the migration laws of non-point source pollution, such as nitrogen, phosphorus, heavy metals and pesticides, under the influence of complex factors must be explored, the spatiotemporal scope and degree of non-point source pollution should be accurately identified, and the loss of non-point source pollution should be effectively reduced to ensure the quality of fruits, improve the ecological benefits of orchards, and reduce environmental risks.

Keywords: orchards; non-point source pollution; migration characteristics; influencing factors; farming methods; rainfall characteristics

随着点源污染得到有效控制,农业面源污染造成的水环境问题日益凸现。2021年第二次全国污染源普查公报揭示农业源是水环境化学需氧量、总氮和总磷的主要来源,排放负荷分别占全国排放总量的49.7%、46.5%和67.2%。果树作为经济种植业的一种,果园面积逐年扩大。即使在土地资源紧张的上海,2020年果园面积也增加到179.66 km²,是2000年的1.67倍。随着人们生活水平的提高,水果需求量增大,目前中国水果面积和产量位居前6位的分别为柑橘、苹果、梨、桃、葡萄和香蕉,其种植面积、产量和产值仅次于粮食和蔬菜。然而,中国果树大多单纯作为经济作物,依靠投入过量化肥来维持土壤肥力,增加产量,种植管理水平仍有待改进。当过度追求经济效益和产量时,过量施肥以及不科学施用农药使土壤养分不能及时循环调整,不仅导致土壤退化,降低果园生产潜力^[1],还导致水果品质变劣,市场竞争力降低。此外,过量施用的氮磷肥料、残留农药及其含有的重金属随降雨径流及灌溉迁移进入地下水和地表水,不仅对河流、湖泊等水体的环境质量产生影响,

危害水生态系统,而且给人口密集的城镇带来潜在风险。特别是位于饮用水源地周边的果园,其面源污染还会增加水源地风险,威胁饮用水安全。现有面源污染研究主要聚焦农田,取得了丰富的研究成果,然而,果园面源污染研究的关注度不高,尚未引起足够重视。在农田面源污染控制及管理措施逐步完善的情况下,果园面源污染成为威胁周边水环境安全的重要因素之一,对水环境造成的影响不容忽视。为此,本文基于国内外最新研究,从果园面源氮磷、重金属、农药污染的来源、迁移特征及影响因素等方面进行分析,总结现有研究成果,剖析不足,并提出未来研究建议,为科学防控果园面源污染、减少周边土壤和水环境影响提供理论依据与研究参考。

1 果园面源污染的来源和迁移特征

果园面源污染主要来源于过量施用化肥以及不科学使用农药,与农田作物覆盖率高不同,果园林下植被稀少,地表面积裸露,并且翻耕频次低,蓄水保土能力差,无法对污染物输移进行有效拦截,其面源污

染流失大于农田。

1.1 果园肥料施用及迁移特征

不同果园的施肥种类、氮肥施用强度详见表 1。国内蜜柚、梨园、葡萄园、猕猴桃园的氮肥施用量在 565~1 071.2 kg/(hm²·a)^[2], 总体高于农田氮肥施用水平, 如孙家小流域稻田、花生地氮肥施用为 567 和 359 kg/hm²^[3]。在国外, 美国南加州特美谷流域 8

种不同土地利用的径流硝酸盐调查表明, 果园对该地区径流中的硝酸盐的贡献最大^[4]; 美国弗吉尼亚州温彻斯特农业研究推广中心的高密度苹果园通过施用氮肥增加果树营养并提前结果, 当施用量超过植物需求时, 施用的氮肥流失, 造成地下水污染^[5]。中国 31 个省份果树化肥过量投入导致氮磷养分大量过剩, 利用效率低于 35%^[6]。

表 1 不同果园施肥特征
Table 1 Fertilization characteristics of different orchards

果园类型	区域	肥料种类	氮肥施用强度/ (kg·hm ⁻²)	施用时间	文献
蜜柚果园	福建省九龙江	复合肥	464.58	12—1月, 3—7月	方燕 ^[7]
		尿素	152.19		
		磷酸二铵	120.15		
		有机肥	64.08		
梨园	江苏省苏州市吴中区太湖西山岛衙角里村	商品有机肥	114.74	10月下旬至11月上旬	宋科等 ^[8]
		尿素	105.14	3月中上旬	
		复合肥	374.98	4月下旬至5月上旬	
葡萄园	河北省永定河流域	有机肥	428.00 其中施用尿素占 72%, 磷酸二铵占 44%, 硫酸钾占 8%, 复合肥占 72%	3—5月	王志慧 ^[9]
		有机肥	206.6	10月—11月	
猕猴桃果园	陕西省秦岭北麓	氮肥	891	1a内	路永莉等 ^[10] Lu Yongli 等 ^[11]
		氮肥	978	1a内	Gao Jingbo 等 ^[12]

果树过度施用氮肥、磷肥, 在强降雨和过度灌溉下造成肥料流失, 增加果农成本, 难以实现果园可持续发展^[1]。与农田相比, 果园总体施用的肥料更多, 流失系数也更大。陕西省俞家河流域土地利用从传统农田改造成集约型猕猴桃园后, 氮投入增加 2.8 倍, 氮环境负荷增大 2.5 倍, 猕猴桃果园浅层地下水硝酸盐含量超过《生活饮用水卫生标准 (GB5749—2022)》的 10 mg/L^[11]。山东省栖霞市苹果园的氮、磷流失系数分别为 68.91 和 2.79 kg/(hm²·a), 高于普通农田氮、磷流失系数 [49.90 和 2.24 kg/(hm²·a)]^[13]。浦东新场镇果园村桃园土壤可溶性磷含量均超过富营养化水体的磷含量, 对地下水富营养化造成潜在威胁^[14]。高氮磷输入土壤累积扰乱了农业生态系统的氮循环, 对生态环境也带来了威胁。

在灌溉、晴天和降水的交叉作用下, 干旱—湿润的水文循环使土壤结构发生变化, 果园氮磷污染物发生横向与纵向迁移。在横向, 氮磷污染物通过地表径流和壤中流在地表和地下扩散迁移, 在纵向, 氮磷污染物通过下渗往土壤深处迁移。果园施用化肥的氮磷主要流失形态为可溶性总氮和颗粒态磷, 江西省泰和县灌溪镇千烟洲中下游的桔园施用化肥造成的氮

损失以氨氮为主^[15]。在空间分布上, 对于坡地果园, 不同坡位土壤中的全氮、全磷、速效磷和碱解氮养分含量变化趋势基本一致, 均在坡底出现累积, 特别是黏性土质果园的地势较低处, 氮磷存在聚集现象, 与黏性土质对污染物有较高吸附亲和力有关。对于平原地区的果园, 污染物相对更易滞留, 土壤—植被对污染物截留作用大于坡地果园。与农田、茶园相比, 果园土壤中氮素和速效磷具有较强的空间变异性, 菜园土、水稻田、茶园土和果园土壤全氮的变程分别为 1.08, 2.01, 2.67, 2.84^[16]。降雨对果园不同深度土壤的氮磷分布产生影响, 研究者发现河北省张家口永定河流域的桑干河段 0—40 cm 土层硝态氮含量雨后均低于雨前^[9], 秦岭北麓坡地猕猴桃园雨季后硝态氮从土壤 0—100 cm 土层向 100—200 cm 下层淋溶损失^[17], 上海南汇新场镇果园村土壤表层可溶性正磷酸盐随降雨发生渗漏且渗漏强度随土层深度增加而降低^[18], 崇明柑橘园氨氮和硝态氮在降雨作用下向深层土壤淋洗, 湖北省丹江口市习家店镇小茯苓村典型坡地柑橘园施用氮肥后 0—80 cm 土层中碱解氮含量明显提高, 施用磷肥后 0—40 cm 土层中速效磷含量增加。磷肥受其限制发生吸附固定和化学反应固定,

速效磷随水移动的距离较小,渭北苹果园土壤速效磷主要分布在水平方向 0—20 cm,垂直方向 0—30 cm 区域,速效钾是强电解质,在垂直和水平方向上都能迁移 0—40 cm^[19]。在时间分布上,果园面源污染迁移特征与降雨时空分布一致,一般发生在一年中的雨季,暴雨加速果园土壤氮磷等营养物质流失并迁移至地表水和地下水。管理粗放的规模化柑橘园在春季施肥遇强降雨后径流氮磷流失浓度达到极值,溶解态氮和磷的平均浓度达到 17.57 和 0.97 mg/L^[20]。受果园等农业活动影响,卡奥平河的河流雨季(5—10月)生物需氧量和氨氮浓度高于旱季^[21]。崇明柑橘园土壤中氨氮和硝态氮的峰值出现在 4 月底和 6 月底,与雨季基本耦合,比施肥时期略有延后。

1.2 果园土壤重金属来源及迁移特征

果园土壤重金属来源分为自然来源和人为来源。自然来源与区域土壤本底有关,如位于岩溶地区的果园,特殊地质背景导致土壤重金属问题严重。人为来源主要有化肥施用、农药喷施、污水灌溉、工业活动和交通活动等,在果园未被污水灌溉、周边没有工业活动的情况下,肥料、农药、交通活动是果园土壤重金属的主要来源。禽畜粪便等有机肥中的重金属 Pb, Cr, Mn, Zn 含量高于化肥,我国磷肥样品中 Cd 含量在 0.1~571.0 mg/kg 之间,长期施用导致土壤 Cd 积累,汽车尾气含有 Pb, Cr, Cd, Cu 等重金属,导致道路周边的果园土壤重金属浓度增加。农药喷施也会导致果园土壤重金属增加,如苹果园中使用的一些农药富含 Hg, 20 世纪初砷酸铅广泛用于控制苹果和李子果园的昆虫,持续使用导致土壤 Pb 和 As 水平升高^[22]。此外,农用化学品和土壤改良剂的大量使用也会导致果园土壤 Cu 和 Zn 浓度的升高^[23]。在不同区域的果园,研究者对重金属的来源进行了溯源,如海南省各种果园中 Pb, Cd, Hg 负荷较高,其中 Pb 除了来源于磷肥外,还来源于汽车尾气、工业污染和农药, Cd 来源于农药、化肥和其他农业投入的累积^[24];突尼斯北部 Oued El Maadene 盆地水系沉积物中发现 As, Cd, Pb, Zn, Cu 等微量金属,除了矿山废弃物影响外, Cu 和 As 与以前果园施用的铜基杀菌剂有关^[25]。

一般来说,由于施肥、喷药、大气沉降等因素,大部分表层土壤重金属含量高于底层土壤,在果园翻耕、土壤生物活动、降雨径流冲刷入渗等因素作用下,重金属在土壤中进行迁移,一方面,降雨冲刷土壤携带泥沙颗粒吸附重金属向下游迁移,另一方面,降雨入渗导致土壤胶体与重金属在横向和纵向发生释放和迁移^[26]。土壤胶体对不同重金属的携带能力存在差异,研究者发现在同一降雨强度下,土壤胶体 3 种

重金属迁移携带能力顺序依次为: Pb > Cu > Cd^[26]。

不同重金属在土壤剖面分布情况不同。在日本某葡萄园,与腐殖质相关的 Zn 在地表显著累积,土壤剖面最上层(0.5~1.0 cm)达到 291 ± 6 mg/kg,在 10 cm 深度逐渐降至 246 ± 26 mg/kg; Cu 与腐殖质伴生,在土壤 10—15 cm 处达到 201 ± 9 mg/kg,在 0—25 cm 深度平均浓度为 177 ± 17 mg/kg。广西桂林市恭城县某果园属于岩溶区,土壤剖面 Cd, Cu, Ni 和 Zn 元素最大迁移率均出现在 50—60 cm 处,其中 Ni 和 Cd 高于撂荒地(30—40 cm), Cu 和 Zn 低于撂荒地(60—80 cm)^[27]。陕西省白水苹果园土壤剖面中重金属 Cr, Ni, Cu, Zn, Pb 等含量在 0.6~1.6 m 土层明显较高, Hg 含量在 0.3~0.8 m 土层深度较高, Cd 含量在整个剖面变化波动较小^[28]。另外,果园土壤 Cr, Ni, Zn, Cu, As 和 Hg 浓度随时间增加逐渐积累,有些果园在果树生长期前后土壤重金属含量存在差异,如山西省太谷县苹果园生育初期土壤上层和深层 100—120 cm 处 Cd 含量最高值为土壤背景值的 1.44 倍,但生育末期土壤重金属含量均小于土壤背景值^[29]。对于土壤存在重金属污染的果园,果园作物也会受重金属污染的影响,如位于岩溶区的广西桂林市恭城县某样地果园内作物中 7 种重金属元素风险评价排序为: Pb > Ni > Zn > As > Cr > Cu > Cd, 其中果园作物中 Pb 和 Ni 存在重度污染, As 和 Zn 分别存在轻度和中度污染, Cr 存在轻微污染^[27]。

1.3 果园农药施用及迁移特征

国内对果园使用农药的类型、用量、降解周期等情况开展了大量的研究(表 2),目前使用的农药主要为苯并咪唑类农药、拟除虫菊酯类农药、除草剂、有机氯农药、有机磷农药、无机铜素杀菌剂和无机硫制剂等,降解周期在几天到几个月不等,降解产物为微毒、低毒和中毒不等。苯并咪唑类农药的代表性药物为甲基硫菌灵和苯菌灵,性质稳定,难降解,易残留,在生产过程中广泛使用。多菌灵虽能在生物体内降解,但仅限于活体中降解,不同作物上残留情况有所差别,在石榴上安全间隔期长达 65.4 d—103.4 d^[30],在山东、河北、安徽安全间隔期为 21 d。多菌灵降解速度缓慢,半衰期在裸露土壤中为 6~12 个月,在生长植被的土壤中为 3~6 个月,土壤中培养 250 d 后仍有 5%~13% 残留^[31]。拟除虫菊酯类成分虽然在土壤中残留期不足 1 d,但代谢产物为中毒。

与农田相比,果园农药使用量更高,单位平均农药费用约 3 000 元/hm²,是大田农作物的 3~4 倍。以喷雾形式喷洒的农药仅有约 30% 附着在果树上,其余大部分落于土壤或漂浮于空气中,通过渗漏、飘

移等方式流失,对土壤、水体和大气造成污染,如吡蚜胺(杀虫剂)广泛应用于果园叶螨防治,通过喷雾和降雨径流等途径进入水体,对水质 pH 值、溶解氧、硝酸根、硫酸根离子等产生负面影响,导致水质恶化。残留农药破坏果园生态平衡,导致有害生物抗性增长和

次要有害生物上升,使果园病虫害防治趋于困难。缺乏科学规范用药通常造成果园农药流失和浪费,农药利用率低,而且,人工种植果园与自然林地相比,土壤保水能力弱,土壤中累积农药易随水土流失迁移至水体,更易危及生态系统的安全与健康。

表 2 果园农药施用特征
Table 2 Application characteristics of pesticides in orchards

名称	类型	用量	降解周期(土壤中)	降解产物	产物毒性	文献
甲基硫菌灵 (对苹果)	苯并咪唑类农药	450~900 g/hm ²	半衰期约 1 d, 28 d 完全分解	多菌灵, 后为 2-氨基-苯并咪唑和酯类	微毒	傅丽君 ^[32]
苯菌灵(对苹果)	苯并咪唑类农药	4050 g/hm ²	半衰期 3—6 月	多菌灵, 后为 2-氨基-苯并咪唑和酯类	微毒	段国兴 ^[31]
氰氟菊酯 (对苹果)	拟除虫菊酯类农药	60~150 g/hm ²	残留期不足 1 d	3-苯氧基苯甲酸(PBA)和 2,2-二甲基-3-(2,2-二氧乙烯基)环丙酸(DCVA)	中毒	王智睿 ^[33]
氰戊菊酯 (对苹果)	拟除虫菊酯类农药	施药用 20% 乳油 5 000~8 000 倍喷雾	完全消解需 28 d	酯链断裂产物	中毒	朱恒等 ^[34]
三氟嘧啶草胺 (对苹果)	PPO 抑制剂类 除草剂	有效成分 20~50 g/hm ²	5%三氟嘧啶草胺半衰期为 0.26—4.19 d			高美珠 ^[35]
三氯杀螨醇 (对苹果)	有机氯农药	200~400 mg/kg, 3 000~4 000 倍液喷雾	1 年以上			张立功 ^[36]
敌百虫 (对苹果、柑橘)	有机磷农药	90% 晶体敌百虫 1 000~1 500 倍液喷雾	7~10 d	氯化氢、氧化磷	低毒	张立功 ^[36]
马拉硫磷 (对桃树)	有机磷农药	30% 马拉硫磷 1 500 倍液喷雾	7—10 d	马来酸二乙酯和二甲基磷硫代硫酸盐	低毒	张立功 ^[36]
波尔多液 (对苹果)	无机铜素杀菌剂	1:1:160~200(硫酸铜:生石灰:水)倍喷雾, 20~30 d 喷雾一次	15~30 d	铜离子析出	中毒	宁学源等 ^[37]
石硫合剂 (对苹果)	无机硫制剂	发芽前施用 3~5 波美度, 生长期施用 0.1~0.5 波美度	45~60 d	硫酸钙和硫磺	低毒	杨勤民等 ^[38]

农药从果园冠层到地表及下游的迁移与农药施用、降雨分布和植被覆盖密切相关。果园农药喷施方式对农药浓度迁移有着重要影响,如晴天在果园冠层喷施,农药缺乏水分运迁移,且农药在果树冠层降解挥发率高,迁移至土壤表层农药较少。在施药初期,土壤中农药空间分布与施药点位和施药量有关,随着降雨发生及时间推移,农药空间分布主要与地表径流路径相关。暴雨径流是水溶性杀虫剂的主要迁移驱动力,且迁移方式与地表植被相关性较大,弗吉尼亚理工大学城市园艺中心径流噻虫嗪浓度裸地最大,为 $1.72 \pm 0.605 \mu\text{g/L}$,覆盖植被园地的渗流浓度最低,为 $0.17 \pm 0.265 \mu\text{g/L}$ ^[30]。在降水冲刷下,农药从果树冠层、树干迁移至地表,在径流和泥沙携带下输移至河流或湖泊中,污染地表水体。Glinski D A 等^[39]测量了美国乔治亚州蒂夫顿附近受农业影响的树干径流、树冠水和地表水中的农药浓度,地表水最高农药浓度为 $10.50 \mu\text{g/L}$ 的甲草胺,地表水和树干流样品中最常

检测到的农药为草胺,浓度在 $0.09 \sim 10.5 \mu\text{g/L}$,树冠水常检测到的农药为联苯,浓度在 $0.02 \sim 0.07 \mu\text{g/L}$,农药在树干茎流和树冠径流中产生高浓度母体和代谢物,随着降雨冲刷使附近溪流和湿地中农药浓度升高。

农药在土壤中的迁移与降雨特征、农药性质、土壤特征和土壤水分运移有关。弱吸附性农药施用后迁移受短期降雨特征影响大,中等吸附性农药迁移受降雨、蒸发的季节性双重影响。溶解态农药迁移受流域降雨强度、排水系统和土壤水力特性的影响,吸附态农药迁移则与泥沙运动密切相关,易受坡度、植被和传输距离等因素的影响。5 种新碱类农药(吡虫啉、噻虫胺、噻虫啉、噻虫嗪、吡虫啉)在红壤土、水稻土、潮土 20—30 cm 淋溶层及淋出液中质量百分比分别为 $73.8\% \sim 87.4\%$, $1.3\% \sim 62.3\%$ 和 $10.5\% \sim 71.8\%$,在红壤土中属于易淋溶,在水稻土、潮土中属于可淋溶,土壤有机质含量越高,农药在土壤中越难淋溶^[40]。

杀虫剂杀扑磷在土壤中的峰值浓度主要出现在表层以下,随着土层深度增加而迅速下降,在深度超过0.705 m 土壤中杀扑磷暴露水平可忽略不计,但随着土层深度增加,农药的累积效应和延迟效应逐渐显现并增强,在农药喷施后,深层土壤(0.575~3.505 m)杀扑磷峰值出现较晚,降雨强度和降雨持续时间对杀扑磷深渗漏起着重要作用。

1.4 存在不足

现有研究对果园肥料的施用强度、迁移路径、迁移范围以及流失系数进行了监测和分析,我国农业管理部门对果树在不同阶段、不同病症表现情况下施用农药的名称、使用剂量、次数、安全间隔期制定了管控技术,国内外对农药、重金属的迁移路径、迁移范围或迁移浓度进行了监测研究,取得了较好的成果,为果园面源污染防治提供了数据支撑。但是,不同类型果园的土壤特征与养分管理存在差异,对肥料施用和配比要求也不同,不同施肥量、施肥时间、施肥方式均会影响氮磷营养物质的淋溶、输出及冲刷、迁移浓度。目前尚未针对不同果品类型、不同土壤成分、不同区域自然降雨特征的果园,系统分析在满足果品质量不

下降、施肥不过量的双重目标下,果园肥料施用的精细化管理措施。此外,目前国内存在大量分散果园,部分区域管理水平低,农药喷施方式较为传统,农药利用效益低,损失量大,不仅造成浪费,而且对土壤、地下水、地表水系统造成健康风险;国内果园面源污染影响分析大多针对泥沙、氮、磷等污染物,对果园农药、重金属随着降雨径流长距离的迁移规律研究相对较少,这些均不利于果园种植全生命周期的优化管理以及面源污染多要素的生态阻控。

2 果园面源污染影响因素分析

影响果园面源污染流失的因素主要包括3个方面:①果园特征,如果树类型、土壤理化特征、坡度等;②气候特征,如降水、风速、辐射、气温等气候特征;③人工管理,如施肥方式、灌溉频次、林下植被种植方式等(图1)。果树类型、土壤质地、地形地貌与区域特征和种植需求有关,一般较为固定,果园施肥方式、喷药方式、灌溉频次、修剪方式为果树日常管理措施,在采用常规管理方式下,面源污染最主要的影响因素为耕作方式和降雨条件。

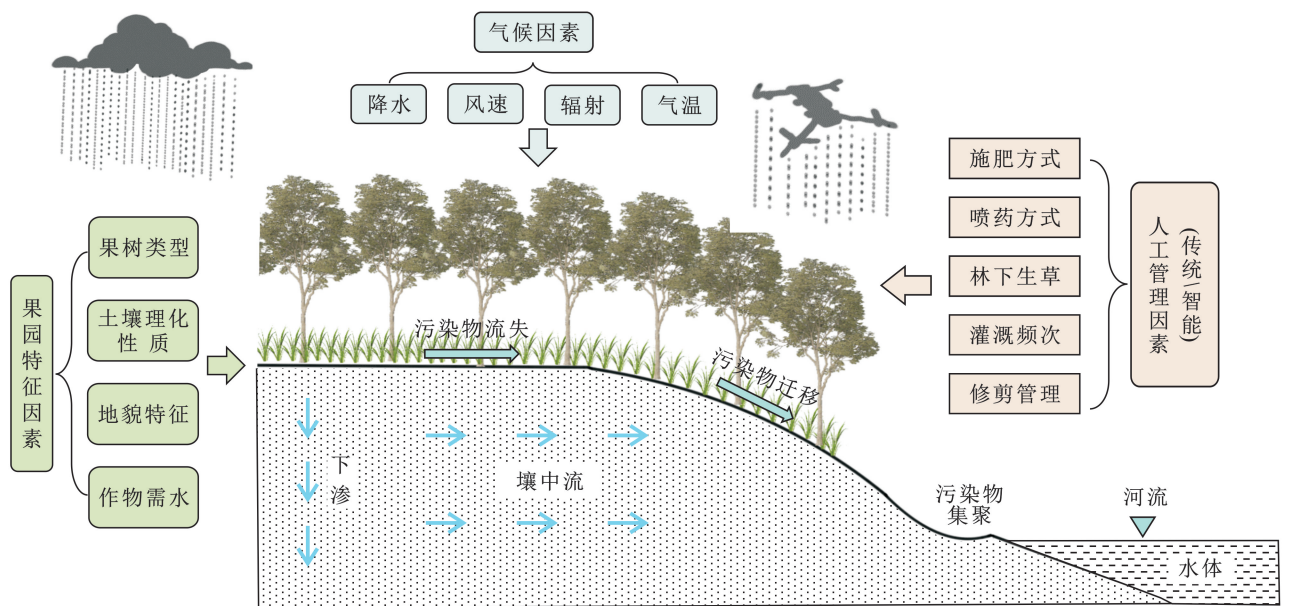


图1 果园面源污染影响因素

Fig.1 Factors affecting non-point source pollution in orchards

2.1 耕作方式对果园面源污染的影响

2.1.1 耕作方式对面源污染中泥沙及氮磷的影响

耕作指在土壤表层进行翻耕、平整、松土、种植林下植被等,是果园生产的重要组成部分。果园在没有植被覆盖情况下,土壤体积密度增大、孔隙度减少,与地被植物竞争果树营养相比,裸露土壤对果园生产力更为有害和不可持续。研究者在裸土样地径流中检测到

高浓度三嗪型除草剂残留物,对周边饮用水源存在显著污染风险^[41]。生草栽培是果园控制水土以及养分流失常用的一种模式,果园林下植被降低雨滴直接溅蚀地表的动能,根系生长加强土壤的锁水能力^[42],而且林下种植生草不仅改善土壤孔隙结构,增加雨水渗透量,减少地表径流量,还能拦截面源污染,减少果园面源污染向下游迁移^[1]。与清耕法相比,林下种植

生草后径流氮磷营养盐的生态拦截效应提高效果明显,有效延迟径流峰值产生时间,减少泥沙、全氮、氨态氮和全磷污染物流失。一些果园林下种植生草对径流及面源污染的削减效果详见表 3,可削减径流 7.1%~98.7%,控制泥沙 15.7%~99.8%,截留氮、磷分别为 4.6%~98.5%和 15.3%~96.6%。与传统果园“清洁栽培”相比,果园林下种植生草对减少果园

水土和氮磷养分流失有着显著效果,全园生草种植控制水土和养分流失效果更好。另外,雨季应减少果园杂草收割频次,割草后植被对雨水冲刷土壤颗粒的截留作用减弱,研究表明坡度为 5°的无花果园在夏季割草后,暴雨下单位面积径流污染悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)分别增加 30%~46%,11%~29%,11%~22%^[43]。

表 3 果园生草种植对削减面源污染的影响(相对清耕)

Table 3 The impacts of planting grass in orchards on reducing non-point source pollution (relatively grassless cultivation)

果园类型	地点	年均降雨量/mm	耕作方式	径流削减/%	泥沙削减/%	氮削减/%	磷削减/%	文献
10年生苹果园	山东胶州	695.6	人工种植鼠茅草	88.3~98.7	—	90.0	—	毕明浩等 ^[44]
柑橘园	丹江口库区坡耕地	966.4	套种三叶草、黑麦草、苕子等绿肥作物	13.9~31.6	15.7~36.4	23.9~30.5	33.3~52.8	李太魁等 ^[45]
	江西德安水土保持生态科技园	1 638	前埂后沟、梯壁植草、水平梯田、果园横坡间作农作物	71.4~95.5	73.17~99.84	98.5(总氮),97.8(氨氮)、	96.6	林圣玉 ^[46]
桃园	浦东新区南汇新场镇	1 200	白三叶、菊苣、紫花苜蓿	35.0~58.4	—	73.0,23.1,51.4	63.3%,73.4,71.2	张兴兴 ^[47]
柑橘园	重庆市西南大学国家紫色土肥力与肥料效益监测站	1 115.3	黑麦草、光叶苕子、2月兰	7.1~27.3	16.97~66.16	—	24~49	刘瑞等 ^[48]
金桔园	广西壮族自治区桂林市阳朔县白沙镇石塘村金龟洞屯张家果园	1 640	间种雀稗	—	—	4.61~24.55(总氮),9.97~48.03(氨氮),17.46~96.46(硝态氮)	15.30~26.49	李婷婷等 ^[49]
蜜柚园	福建省漳州市平和县	1 574	1.5 m 宽带状白喜草	—	—	41.11~49.06	33.86~41.73	濮阳雪花等 ^[50]
鳄梨园	智利	2 483	生草	61.1	99.5	—	—	Atucha A 等 ^[41]
苹果园	山东省泰安市刘家水库东山	700	播种三叶草草种	—	42.6	60.6	54.4	牟信刚等 ^[51]
各种果园	73 篇文献	—	生态栽培	59.5	86.9	52.2	65.4	牛清清等 ^[52]

2.1.2 耕作方式对面源污染中重金属的影响 果园林下种植生草能够有效截留径流重金属,使土壤中重金属含量降低,对重金属污染风险防控具有一定积极作用。重庆市西南大学柑橘园林下种植黑麦草、毛叶苕子和白花三叶草,分别使土壤 Mn 含量比其峰值时期下降 1.19%,5.15%和 0.44%,Zn 含量比其峰值时期下降 4.45%,2.83%和 3.33%,其中黑麦草对 Pb 和 Cr 控制效果最优,相比峰值时期分别下降 3.96%和 3.54%。江西省赣州市脐橙果园梯壁种植百喜草后,径流流失的 Ni,Cu,Cr,Zn,Pb,Cd 和 Hg 分别比清耕减少 33.3%,69.7%,39.5%,88.5%,88.3%,18.8%和 57.5%^[53]。西班牙东南部 Granada 和 Malaga 果园混合种植樟子草、紫苏草、紫花苜蓿、蒲公英、雀麦等一年生草本植物后,与裸露土壤相比,径流流失的 Mn,Ni,Mo,Cu 和 Zn 分别减少 52%,69%,71%,82%和 76%。除林下生草栽培外,水稻秸秆覆盖土壤也能够

截留一部分重金属,如土壤箱(深度 20 cm,表面积 1 m²)上覆盖稻草(覆盖率 200~500 g/m²),在强度 90 mm/h、历时 60 min 的降雨下,径流量、泥沙、重金属分别下降 31%~50%,93%~97%和 79.9%~90.1%,Cd,Cu,Zn 和 Ni 主要与泥沙颗粒结合进行迁移,并在沉积物中高度富集,秸秆通过截留沉积物从而减少颗粒态重金属(尤其是 Cd 和 Ni)随径流迁移,这也是控制重金属对环境造成污染风险的有效措施之一。

2.1.3 耕作方式对面源污染中农药的影响 目前耕作方式对果园面源污染中农药影响的研究相对较少,部分学者研究了草地过滤带对农药的削减效果,发现径流水中溶解态阿特拉津除草剂和百菌清杀菌剂的质量浓度分别减小 60%和 6%以上,吸附态阿特拉津和百菌清污染负荷减小 80%以上^[54],间接说明果园林下种植生草对农药削减也应有一定的积极作用。

2.2 降雨特征对果园面源污染的影响

2.2.1 降雨特征对面源污染中泥沙及氮磷的影响

降雨径流是造成面源污染迁移转化的主要驱动力,在一场降雨过程中,产流时间、产流强度滞后于降雨发生时间和降雨强度,果园的氮磷流失浓度总体呈下降趋势。Zhang Nan 等^[1]发现中国南方坡地柑桔园降雨径流氮磷浓度初期较高,后期稳定在 $0.26\sim 0.40\text{ g/m}^3$,连续降雨前 $1\sim 3\text{ d}$,果园土壤侵蚀和氮磷养分流失最为严重。在强降雨下,果园径流中颗粒物、总氮和总磷浓度随着降水强度发生变化,整体上从高迅速降低,最后变缓。研究者发现降雨前期污染物流失约 60% ,降水历时和降雨强度明显影响果园面源污染流失量^[43];在雨量 90 mm 、历时 60 min 的降雨条件下,柑橘园裸坡地表径流前 5 min 迅速上升,随后保持稳定,泥沙、氮磷流失通量在降雨初期 $10\sim 15\text{ min}$ 内迅速下降随后趋于稳定;在 7 d 连续降雨模拟过程中,地表径流量前 2 d 逐渐升高,第 $3\sim 5\text{ d}$ 逐渐下降,随后保持稳定,泥沙流失量在降雨前 5 d 逐渐下降,氮磷污染在前 3 d 迅速下降随后缓慢下降。因此,在控制果园面源污染时,应优先关注并截留处理初期径流污染,既减少肥料氮磷养分的损失,又降低对周边水环境的影响。

在不同场次降雨下,果园径流与氮磷面源污染输出差异明显,孙辉等^[55]发现硝态氮、铵态氮、总氮、溶解磷及总磷变化幅度在 200% 以上。与道路径流污染高浓度通常出现在中小雨期间不同,果园的土壤具有渗透作用,小雨和低强度中雨基本不产流,高强度中雨、大雨和暴雨才产生径流。极端降雨下果园径流系数和土壤养分流失分别是普通降雨下 2.6 和 11.5 倍,产沙量(贡献率 42.9%)高于地表产流(贡献率 16.4%)^[56],施肥后第一场暴雨径流氮磷流失尤为严重^[20]。暴雨冲刷表层土壤大量氮磷养分,造成受纳水体氮磷营养盐输出脉冲,某蜜柚林小流域高流量的洪水时期以 10% 历时输出 38% 的硝酸盐负荷,低流量时期以 69% 历时输出 34% 的硝酸盐负荷。三峡库区中部重庆市万州区龙沙镇龙安村果园暴雨和短历时大雨期间前期 20% 的地表径流输出了超过 50% 的污染物负荷^[20]。暴雨事件中可溶磷是磷素流失的主要形态,大雨事件中颗粒态磷是磷素流失的主要形态,与暴雨破坏土壤磷吸附状态,从而使土壤磷素以可溶态流失有关^[14]。因此,需要关注大雨、暴雨及以上降雨的果园面源污染,对周边水环境污染预警预报具有重要意义。

果园面源污染与降雨特征因子存在不同的关联性。江西省新余市佳和农林有限公司柑橘园裸坡累

积径流量与降雨历时呈线性函数关系,污染物流失量与降雨历时呈曲线函数关系; 7 d 连续降雨模拟中日径流量与降雨天数呈指数函数,泥沙流失量与降雨天数呈二次函数,总氮、氨态氮、总磷日流失量与降雨天数呈极显著回归($p < 0.01$),硝态氮日流失量与降雨天数呈显著回归($p < 0.05$)。湖北省十堰市丹江口库区五龙池小流域各形态磷浓度变化趋势和流量变化趋势基本一致^[57]。浙江省淳安县千岛湖镇湖坎村坡地果园土壤中磷流失的主要影响因素是降雨量,并且与总磷、溶解态磷和颗粒态磷均成正相关^[58]。江苏省句容市白兔镇永丰农庄无花果果园径流 TN, TP 浓度与 SS 浓度均呈线性相关,且 TP 与 SS 线性相关性更强($R^2 = 0.9215$),径流冲刷泥沙加大氮磷养分流失风险^[43]。泥沙是携带果园氮磷面源污染的主要载体,因此,在径流产生及汇集过程中,有效截留泥沙是控制果园面源污染的关键。

2.2.2 降雨特征对果园面源污染中重金属的影响

一般来说,降雨强度越大,冲刷土壤能力越强,携带泥沙颗粒越多,重金属迁移量也越大。但降雨量、降雨历时、降雨强度均会对重金属污染输出产生协同影响。在降雨初期,土壤胶体与重金属的共释放、共迁移较为明显,随着降雨持续时间增加,这种现象逐渐减少至稳定^[26]。在不同场次降雨下,重金属输出规律与降雨模式有关,研究者发现在 $55, 100, 120\text{ mm/h}$ 雨强下 Cd 迁移浓度分别为 $0.65, 0.56$ 和 $0.35\text{ }\mu\text{g/L}$,重金属迁移浓度随降雨强度增大而减小,主要因为低强度降雨下径流携带泥沙颗粒更小,细颗粒具有更大的比表面积有利于吸附更多重金属,携带更多重金属迁移。此外,对于小雨,径流产生量相对少,导致重金属浓度相对较高,而在高雨强大雨量下,虽然泥沙冲刷强度大,但径流产生量大,一个降雨事件中重金属平均迁移浓度反而低。有研究者对连续 2 次(间隔 7 d)不同特征降雨(4 场)下葡萄园土壤重金属浸出研究发现,发现第 1 次降雨压实土壤,铜和锌浸出率比第 2 次降雨分别低 30 倍和 50 倍,在持续时间长,强度中等的降雨模式下($30\text{ min}, 55\text{ mm/h}$)下,重金属出现最大浸出负荷, Cu 和 Zn 浸出量为加标剂量的 $3.1\pm 0.3\%$ 和 $2.2\pm 0.2\%$ ^[59]。

2.2.3 降雨特征对果园面源污染中农药的影响

降雨强度、降雨量(产流量)是影响果园农药冲刷和迁移的主要因素。丹江口水库果园样地在两种降雨产流量下(约 200 和 90 L),高产流量事件径流颗粒、水相有机氯农药($\alpha\text{-HCH}$)浓度分别为 39.02 和 2.12 ng/g ,低产流量事件径流颗粒、水相有机氯农药浓度分别为 48.46 和 1.68 ng/g ,颗粒中的农药浓度在低流量事件

中更高^[60]。在表层土壤中,农药峰值浓度受暴雨时间、农药施用时间和施用量的影响,土壤农药的峰值浓度大多在施用农药后第一次暴雨期间发生,从全年来看,地表土壤中农药峰值与夏季雨季降雨事件发生频率和强度密切相关。随着降雨量增加,农药淋失量普遍增加,河流中农药含量呈现与降雨相关的季节性,明尼苏达州罗斯蒙特和南达科他州奥罗拉的冻土中大多数除草剂渗出发生在春季,与该季节融雪、融霜或春雨有关^[61]。

为探明农药在不同降雨特征下的渗滤浓度,现有研究大多在实验室采用渗滤装置进行模拟。Meite F 等^[59]发现降雨量对葡萄园土壤的农药淋溶影响尤为明显,在持续时间长,强度中等的降雨模式下(30 min, 55 mm/h)下,甲霜灵、s-异甲草胺农药淋溶负荷相对最大,分别为加标剂量的 $44.5 \pm 21.5\%$, $8.1 \pm 3.1\%$ 。Malone R W 等^[62]发现在降雨量相同的情况下,改变降雨强度能够使土壤甲草胺除草剂流失增加两倍多,阿特拉津除草剂流失增加近 1 倍。此外, Pandey N^[63]发现在不同模式下(施用杀虫剂后 4, 8 和 24 h 分别出现 40 mm 和 100 mm 降雨),施用农药 4 h 后降雨量为 100 mm 时杀虫剂大量渗出(21.99 ng/ml),径流中杀虫剂浓度达到 42.25 ng/ml。施用农药后不久出现高强度降雨将导致农药通过渗流和地表径流迁移至周边土壤,并进入水系,不仅减少农药使用效率,还对周边环境造成风险。

2.3 存在不足

现有研究对不同耕作方式、林下生草类型削减果园面源污染的效果进行了研究,对果园养分流失管理具有很好的借鉴意义;对场次降雨过程中和不同特征降雨下的面源污染浓度变化规律、对水环境的响应特征进行了研究,为果园面源污染防控提供技术支撑。但现有研究尚未系统对比不同果树类型、不同成长阶段的果园在不同降雨特征下的产流系数、氮磷流失系数及流失负荷强度,尚未建立降雨特征、施肥时间、施肥量、果树生物量、喷施农药时间、施药量与氮磷流失的长期动态响应关系;此外,国内外果园面源污染影响分析大多针对泥沙、氮、磷等污染物,主要采用室内模拟降雨试验法研究降雨径流下土壤重金属迁移机制,但模拟试验条件与自然环境存在较大差异,耕作方式对果园农药的影响研究尚不多见,果园面源污染中重金属及农药的影响机制仍不清晰,不利于果园种植全生命周期优化管理,以及果园低碳可持续发展。

3 结论

(1) 果园氮施用强度基本在 565 ~ 1 071.2

kg/(hm² · a),氮磷流失系数总体高于农田,重金属在果园土壤剖面迁移范围约在 0.005 ~ 0.8 m。弱吸附性农药施用后迁移受短期降雨特征影响大,中等吸附性农药迁移受降雨、蒸发的季节性双重影响,吸附态农药迁移则与泥沙运动密切相关。

(2) 控制果园面源污染应优先处理初期径流,有效截留泥沙。果园种植生草可削减径流 7.1% ~ 98.7%,控制泥沙 15.7% ~ 99.8%,截留氮、磷分别为 4.6% ~ 98.5% 和 15.3% ~ 96.6%,削减重金属 18.8% ~ 90.1%。

(3) 果园面源污染迁移特征与降雨时空分布一致,20%地表径流约输出 50%以上污染负荷,极端降雨下果园径流系数、氮磷流失为普通降雨的 2.6 和 11.5 倍,降雨量、降雨强度是影响氮磷、重金属和农药迁移的主要因素,河流中农药含量呈现与降雨相关的季节性。

4 建议

(1) 探明复杂因素影响下果园面源污染迁移规律,采取果园精细化管理措施。果园面源污染是造成周边水环境污染的重要来源之一,对于不同类型、不同生长阶段的果树,在降雨特征、施肥方式、喷药方式、修剪管理、生物量等复杂因素协同影响下的面源污染流失及迁移特征具有较大差异性。果树修剪、施肥、喷药的方式与其生物量、挂果时间直接相关,也是影响果园面源污染流失特征的重要因素。因此,有待系统研究复杂影响因素变化下的面源污染迁移规律,建立降雨特征、施肥时间、施肥量、喷药时间、喷药量、挂果时间、生物量、林下植被等复杂因素与氮磷营养负荷流失、农药迁移的长期动态响应关系。针对多因素影响因子,精细化确定施肥时间和施肥量,提高肥料施用效能,降低果园土壤氮磷流失对周边水体污染的风险。同时,改进农药施用方式,研究高效低损的喷施技术,减少漂浮于空气或落于土壤中的农药比例,提高农药利用效率。此外,对农药施用加强监管和宣传,采用生物防治技术或优先使用低毒高效新型农药,提高农药精细化利用和集约化使用水平。在此基础上,制定果园精细化管理规范,在保障果品的前提下减少面源污染流失,保育土壤,优化果园种植的全生命周期管理,实现果园低碳可持续发展。

(2) 加强果园面源污染影响范围精准识别,科学设计防控措施。果园面源污染影响因素复杂,耕作、施肥、喷洒农药方式多样化导致土壤中氮、磷、农药等污染物的淋溶特征不同,对水土和养分流失的影响范围也不同,加上降雨随机性强,降雨量、降雨历时、降雨强度变化频繁,影响果园地表径流颗粒物、氮磷和

农药时空迁移及分布特征,难以量化统计,对识别面源污染的影响范围带来困难。因此,有待开展降雨、施肥、耕作、喷药等多因素影响下的果园面源污染长距离输移时空分布特征研究,综合果园坡度、植被覆盖和周边土地利用、土地覆被、数字高程等多维度的地理信息,分析泥沙、氮磷、重金属、农药等面源污染物的时空输移规律,精准识别输移浓度空间范围,判定面源污染影响程度,建立精细化防控措施,从而因地制宜地从源头、过程、末端构建面源污染多级生态防控措施,系统控制果园面源污染,提升果园生态效益,降低环境风险。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Nan, Zhang Qun, Li Yueqiao, et al. Effect of groundcovers on reducing soil erosion and non-point source pollution in citrus orchards on red soil under frequent heavy rainfall [J]. *Sustainability*, 2020,12(3), 1146.
- [2] Gao Jingbo, Lu Yongli, Chen Zhujun, et al. Land-use change from cropland to orchard leads to high nitrate accumulation in the soils of a small catchment [J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30(17):2150-2161.
- [3] 汪亚及,高磊,彭新华.红壤农田小流域径流组分对氮素流失动态的影响[J].*中国科学(地球科学)*,2019,49(12):1960-1973.
Wang Yaji, Gao Lei, Peng Xinhua. Hydrologic separation and their contributions to N loss in an agricultural catchment in hilly red soil region [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2019,49(12):1960-1973.
- [4] Tomas S J. Using GIS Modeling to Determine Nitrate Loading Runoff in the Temescal Wash Watershed, Southern California [M]. Long Beach: California State University, 1999.
- [5] Thompson A A, Peck G M. Alternative fertility management for establishing new apple orchards in the mid-Atlantic [J]. *HortScience*, 2017,52(9):1313-1319.
- [6] Ma L, Velthof G L, Wang F H, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies and losses in the food chain in China at regional scales in 1980 and 2005 [J]. *Science of the Total Environment*, 2012,434:51-61.
- [7] 方燕.蜜柚林小流域土壤—地下水—河流连续体氮的来源、时空变化与输出[D].福建 厦门:厦门大学,2021.
Fang Yan. Nitrogen sources, spatial-temporal changes and export through a soil-groundwater-river continuum in a pomelo sub-watershed, Southeast China [D]. Xiamen, Fujian: Xiamen University, 2021.
- [8] 宋科,秦秦,郑宪清,等.水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果[J].*水土保持学报*, 2021,35(3):83-89.
- [9] Song Ke, Qin Qin, Zheng Xianqing, et al. Effect of drip fertigation combined with plant hedgerows on reducing nitrogen and phosphorus loss by soil surface runoff in orchard [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(3):83-89.
- [9] 王志慧.河北永定河流域葡萄园氮素投入与土壤硝态氮累积特征[D].河北 保定:河北农业大学,2021.
Wang Zhihui. Characteristics of vineyard nitrogen input and soil nitrate nitrogen accumulation in the Yongding River basin of Hebei Province [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2021.
- [10] 路永莉,康婷婷,张晓佳,等.秦岭北麓猕猴桃果园施肥现状与评价:以周至县俞家河流域为例[J].*植物营养与肥料学报*,2016,22(2):380-387.
Lu Yongli, Kang Tingting, Zhang Xiaojia, et al. Evaluation of current fertilization status in kiwifruit orchards on the northern slope of Qinling Mountains: A case study of Yujiahe catchment, in Zhouzhi County [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016,22(2): 380-387.
- [11] Lu Yongli, Zhou Jianbin, Sun Likun, et al. Long-term land-use change from cropland to kiwifruit orchard increases nitrogen load to the environment: A substance flow analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022,335:108013.
- [12] Gao Jingbo, Lu Yongli, Chen Zhujun, et al. Land-use change from cropland to orchard leads to high nitrate accumulation in the soils of a small catchment [J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30(17):2150-2161.
- [13] Wan Wei, Han Yiwen, Wu Hanqing, et al. Application of the source-sink landscape method in the evaluation of agricultural non-point source pollution: First estimation of an orchard-dominated area in China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021,252:106910.
- [14] 张旭.上海市典型都市农业区域非点源磷素污染特征研究[D].重庆:西南大学,2011.
Zhang Xu. Study on Characteristics of non-point source phosphorus pollution from a typical urban agricultural region in Shanghai [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [15] Zhang Yongyong, Gao Yang, Yu Qiang. Diffuse nitrogen loss simulation and impact assessment of stereoscopic agriculture pattern by integrated water system model and consideration of multiple existence forms [J]. *Journal of Hydrology*, 2017,552:660-673.
- [16] 肖峻.宜兴地区农田土壤氮、磷空间分布特征及合理施用量的研究[D].江苏 南京:南京农业大学,2010.
Xiao Jun. Research on spatial distribution characteristics

- of nitrogen and phosphorus of arable soil and rational amount of fertilizer in Yixing [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [17] 高晶波. 秦岭北麓土地利用方式变化对土壤氮素累积及损失的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- Gao Jingbo. Effects of land use change on soil nitrogen accumulation and loss in the northern foothills of the Qinling Mountains [D]. Yanglin, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [18] 吴诗剑, 黄海波, 张旭, 等. 典型都市农业村域果园土壤磷素的渗漏特征研究: 以上海南汇新场镇果园村为例[J]. 科技通报, 2013, 29(11): 195-198.
- Wu Shijian, Huang Haibo, Zhang Xu, et al. Study on the leakage characteristics of soil phosphorous in an orchard in the urban agricultural region of Shanghai [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(11): 195-198.
- [19] 王冲, 秦亚旭, 张珂, 等. 渭北旱塬矮化苹果园滴灌下土壤剖面水分和养分时空分布特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 343-348.
- Wang Chong, Qin Yaxu, Zhang Ke, et al. The spatial and temporal distributions of moisture and nutrients in soil profile of dwarf apple orchards under drip fertigation in Weibei dry-land, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 343-348.
- [20] Yan Kun, Wang YuKuan, Liu Qin, et al. Dynamic process of nitrogen and phosphorus export and loss load in an intensive orchard with ridge and furrow plantation in the Three Goeges Reservoir Area [J]. Huanjing Kexue, 2020, 41(8): 3646-3656.
- [21] Lai Y C, Yang C P, Hsieh C Y, et al. Evaluation of non-point source pollution and river water quality using a multimedia two-model system [J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(3/4): 583-595.
- [22] Codling E, Dao H. Short-term effect of lime, phosphorus, and iron amendments on water-extractable lead and arsenic in orchard soils [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38(7/8): 903-919.
- [23] Sonoda K, Hashimoto Y, Wang Shanli, et al. Copper and zinc in vineyard and orchard soils at millimeter vertical resolution [J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 958-962.
- [24] Wu Xiaofang, Zhou Cailin, Xie Yi, et al. Heavy metal (loid)s in fruit-growing soils of tropical Hainan Island in China: Pollution, ecological-health risks, spatial assessment, and source analyses [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(4): 231-244.
- [25] Ayari J, Agnan Y, Charef A. Spatial assessment and source identification of trace metal pollution in stream sediments of Oued El Maadene Basin, northern Tunisia [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(7): 397.
- [26] Cui Shenshen, Du Xiaoli, Liu Dianwei, et al. Influence of rainfall infiltration on soil colloids-heavy metals co-release and co-migration in infiltration column [J]. Huanjing Huaxue-Environmental Chemistry, 2022, 41(9): 2842-2849.
- [27] 宁静, 马一奇, 杨慧, 等. 西南岩溶区果园土壤—作物系统重金属元素迁移特征与污染评价[J]. 南方农业学报, 2023, 54(4): 1106-1118.
- Ning Jing, Ma Yiqi, Yang Hui, et al. Migration characteristics and pollution evaluation of heavy metal elements in orchard soil-crop system in karst area of Southwestern China [J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(4): 1106-1118.
- [28] 董红梅. 陕西白水苹果园土壤元素分布与环境研究[D]. 陕西 西安: 陕西师范大学, 2014.
- Dong Hongmei. Study on soil element distribution and environment in Shaanxi Baishui apple orchard [D]. Xian, Shaanxi: Shaanxi Normal University, 2014.
- [29] 高晓丽, 马娟娟, 杨治平, 等. 蓄水坑灌果园土—树系统中重金属 Cd 富集特征与风险评价[J]. 节水灌溉, 2020(8): 8-12.
- Gao Xiaoli, Ma Juanjuan, Yang Zhiping, et al. Enrichment characteristic and risk assessment of heavy metal Cd in the soil-apple tree system under water storage pit irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 8-12.
- [30] Mohapatra S, Lekha S. Residue level and dissipation of carbendazim in/on pomegranate fruits and soil [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(7): 406.
- [31] 段国兴. 基于出口标准的陕西苹果农药残留现状与标准化管控: 以出口美国为例[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- Duan Guoxing. Present situation and standardized control of pesticide residues on apple in Shaanxi Based on export standard: Export to the united states as an example [D]. Yanglin, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [32] 傅丽君. 农药对枇杷园生态系的影响与主要害虫生态控制研究[D]. 福建 福州: 福建农林大学, 2005.
- Fu Lijun. Effect of pesticide on loquat orchard ecosystem and ecological control of major pests [D]. Fuzhou, Fujian: Fujian Agriculture And Forestry University, 2005.
- [33] 王智睿. 几种菊酯农药在果园土壤中的残留动态研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.

- Wang Zhirui. Study on residual dynamics of some pyrethrum in orchard soil [D]. Yanglin, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009.
- [34] 朱恒,张丹,张进忠,等.液相色谱—串联质谱法测定果园土壤中的多种农药及其代谢产物[J].西南大学学报(自然科学版),2015,37(11):144-150.
- Zhu Heng, Zhang Dan, Zhang Jinzhong, et al. Determination of multiple pesticides and their metabolites in orchard soil by liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2015,37(11):144-150.
- [35] 高美珠.三氟嘧啶草胺对果园杂草的防效及其在土壤中的残留与水解行为研究[D].江西南昌:江西农业大学,2022.
- Gao Meizhu. Study on the control effect of triflurmethanulchlor on weeds in orchard and its residue and hydrolysis behavior in soil [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2022.
- [36] 张立功.陕西黄土高原苹果园农药使用及残留现状调查与对策研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- Zhang Ligong. Research on Situation and strategies of pesticide usage and residual at apple orchards in the Loess Plateau of Shaanxi Province [D]. Yanglin, Shaanxi: Northwest A&F University, 2006.
- [37] 宁学源,宁安忠.苹果园雨季波尔多液的正确使用[J].落叶果树,2016,48(6):41.
- Ning Xueyuan, Ning Anzhong. Correct use of Bordeaux mixture in apple orchard in rainy season [J]. Deciduous Fruits, 2016,48(6):41.
- [38] 杨勤民,赵中华,王亚红,等.我国苹果园病虫害防治用药情况及减量增效对策[J].中国植保导刊,2018,38(4):57-61.
- Yang Qinmin, Zhao Zhonghua, Wang Yahong, et al. Drug use for pest control in apple orchards in China and countermeasures for reducing and increasing efficiency [J]. China Plant Protection, 2018,38(4):57-61.
- [39] Glinski D A, Purucker S T, Van Meter R J, et al. Analysis of pesticides in surface water, stemflow, and throughfall in an agricultural area in South Georgia, USA [J]. Chemosphere, 2018,209:496-507.
- [40] 胡传鹤,李永涛,尚梦如,等.5种新烟碱类农药在农田土壤中的吸附和淋溶行为[J].农业环境科学学报,2023,42(3):539-546.
- Hu Chuanhe, Li Yongtao, Shang Mengru, et al. Adsorption and leaching behavior of five neonicotinoid pesticides in farmland soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023,42(3):539-546.
- [41] Atucha A, Merwin I A, Brown M G, et al. Soil erosion, runoff and nutrient losses in an avocado (*Persea Americana* Mill) hillside orchard under different groundcover management systems [J]. Plant and Soil, 2013,368(1):393-406.
- [42] Bagagiolo G, Biddoccu M, Rabino D, et al. Effects of rows arrangement, soil management, and rainfall characteristics on water and soil losses in Italian sloping vineyards [J]. Environmental Research, 2018,166:690-704.
- [43] 赵联芳,次仁吉保,王成,等.强降雨下果园除草对径流中颗粒物及营养盐的影响[J].水资源保护,2019,35(3):57-62.
- Zhao Lianfang, Ci R, Wang Cheng, et al. Effect of orchard weeding on suspended solids and nutrients in runoff under heavy rainfall [J]. Water Resources Protection, 2019,35(3):57-62.
- [44] 毕明浩,梁斌,董静,等.果园生草对氮素表层累积及径流损失的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):102-105.
- Bi Minghao, Liang Bin, Dong Jing, et al. Effects of cover crop (*vulpia myuros*) on the accumulation and runoff loss of nitrogen in orchard [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):102-105.
- [45] 李太魁,张香凝,寇长林,等.丹江口库区坡耕地柑橘园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):94-98.
- Li Taikui, Zhang Xiangning, Kou Changlin, et al. Effects of green manure planting on nitrogen and phosphorus losses along with runoff from citrus orchards on sloping land in the Danjiangkou Reservoir Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(2):94-98.
- [46] 林圣玉.水土保持型果园建设模式对非点源污染的防控研究[D].江西南昌:江西农业大学,2011.
- Lin Shengyu. Research on prevention and control to non-point source pollution by orchard construction model of soil and water conservation type [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2011.
- [47] 张兴兴.种植不同牧草对桃园生态环境的影响研究[D].上海:上海交通大学,2011.
- Zhang Xingxing. Effects of planting forage grasses on eco-environment in a peach orchard [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [48] 刘瑞,张宇亭,王志超,等.绿肥覆盖对紫色土坡耕地柑橘园氮磷流失的阻控效应研究[J].水土保持学报,2021,35(2):68-74.
- Liu Rui, Zhang Yuting, Wang Zhichao, et al. Control effect of green manure cover on nitrogen and phosphorus loss of citrus orchard on purple soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):68-74.

- [49] 李婷婷, 韦彩会, 董文斌, 等. 生草栽培与坡度对桂东北坡地果园地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 59-64.
Li Tingting, Wei Caihui, Dong Wenbin, et al. Effects of sod culture and slope on losses of nitrogen and phosphorus in the surface runoff of orchards of northeast Guangxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 59-64.
- [50] 濮阳雪华, 戴子云, 高晨浩, 等. 高尔夫球场生态环境健康评价研究[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 266-274.
Puyang Xuehua, Dai Ziyun, Gao Chenhao, et al. A study on the eco-environment health assessment in golf course [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 266-274.
- [51] 牟信刚, 陈为峰, 史衍玺, 等. 不同措施在防治山地果园水土流失及面源污染中的应用研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(12): 916-919.
Mu Xingang, Chen Weifeng, Shi Yanxi, et al. Applied research on different measures in preventing and controlling mountainous orchard soil erosion and non-point source pollution [J]. Environmental Pollution & Control, 2007, 29(12): 916-919.
- [52] 牛清清, 张琳, 陈云峰, 等. 生态栽培对果园水土及养分流失影响的 Meta 分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3175-3183.
Niu Qingqing, Zhang Lin, Chen Yunfeng, et al. Effects of eco-cultivation on soil erosion and nutrient loss in orchards: A meta-analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(10): 3175-3183.
- [53] 王学雄, 谷战英, 黄齐. 赣南脐橙园水土流失面源污染的初步研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(5): 74-77.
Wang Xuexiong, Gu Zhanying, Huang Qi. Preliminary research on soil erosion and derived non-point pollution of navel orange orchard [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(5): 74-77.
- [54] 霍炜洁, 李昆, 赵高峰, 等. 草地过滤带对地表径流中不同吸附性农药的截留[J]. 人民黄河, 2022, 44(12): 85-90.
Huo Weijie, Li Kun, Zhao Gaofeng, et al. Interception effects of grass filter strips on pesticides with different absorbability in surface runoff [J]. Yellow River, 2022, 44(12): 85-90.
- [55] 孙辉, 黄煜琪, 傅煜, 等. 太湖流域果园种植面源氮磷输出强度及其定量评估方法[J]. 中国环境监测, 2021, 37(5): 133-139.
Sun Hui, Huang Yuqi, Fu Yu, et al. Output intensity and quantitative evaluation method of non-point source nitrogen and phosphorus in orchard in Taihu Lake basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(5): 133-139.
- [56] Duan Jian, Liu Yaojun, Tang Chongjun, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 278: 111537.
- [57] 钟志明. 降雨驱动下农业小流域磷素的迁移特征: 以五龙池小流域为例[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2022.
Zhong Zhiming. Transport characteristics of phosphorus driven by rainfall in the Wulongchi agricultural watershed [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [58] 吕唤春, 陈英旭, 方志发, 等. 千岛湖流域坡地利用结构对径流氮、磷流失量的影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 91-92.
Lü Huanchun, Chen Yingxu, Fang Zhifa, et al. Effect of sloping land use pattern on nitrogen and phosphorus loss in Qiandaohu watershed [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16(2): 91-92.
- [59] Meite F, Alvarez-Zaldivar P, Crochet A, et al. Impact of rainfall patterns and frequency on the export of pesticides and heavy-metals from agricultural soils [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616: 500-509.
- [60] 邵超, 张坤峰, 周天健, 等. 丹江口水库库边降雨径流中有机氯农药赋存及风险评价[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 1046-1053.
Tai Chao, Zhang Kunfeng, Zhou Tianjian, et al. Distribution characteristics and risk evaluation of organochlorine pesticides in runoff from typical area of Danjiangkou Reservoir [J]. China Environmental Science, 2012, 32(6): 1046-1053.
- [61] Clay S A, Koskinen W C, Baker J M. Alachlor and metolachlor movement during winter and early spring at three Midwestern sites [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 1995, 30(5): 637-650.
- [62] Malone R W, Weatherington-Rice J, Shipitalo M J, et al. Herbicide leaching as affected by macropore flow and within-storm rainfall intensity variation: A RZWQM simulation [J]. Pest Management Science, 2004, 60(3): 277-285.
- [63] Pandey N, Rana D, Chandrakar G, et al. Role of climate change variables (standing water and rainfall) on dissipation of chlorantraniliprole from a simulated rice ecosystem [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 205: 111324.