



生草覆盖及配合化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响

程子珍, 范先鹏, 夏颖, 刘冬碧, 谭勇, 严昶, 樊丹, 廖贵新, 胡磊磊

引用本文:

程子珍, 范先鹏, 夏颖, 刘冬碧, 谭勇, 严昶, 樊丹, 廖贵新, 胡磊磊. 生草覆盖及配合化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(6): 1358–1367.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0169>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

牛粪化肥最优配比条件下不同轮作方式对稻田氮磷流失的影响

普燕爽, 王春雪, 陈建军, 李元, 祖艳群, 张克强

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(2): 286–294 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0270>

湖北省三峡库区不同种植模式下农田地表径流氮磷流失特征

刘方谊, 夏颖, 黄敏, 雷秋良, 刘宏斌, 范先鹏, 张富林, 吴茂前

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(6): 550–558 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0030>

不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律

王月, 房云清, 纪婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(6): 814–821 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0210>

洱海流域不同轮作与施肥方式对农田氮磷径流损失的影响

姚金玲, 郭海刚, 倪喜云, 王风, 郑宏艳, 杨怀钦, 杨苏树, 任天志

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(5): 600–613 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0039>

不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征

李盟军, 艾绍英, 宁建凤, 王荣辉, 姚建武, 余丹妮

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(1): 33–42 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0091>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程子珍, 范先鹏, 夏颖, 等. 生草覆盖及配合化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1358–1367.

CHENG Z Z, FAN X P, XIA Y, et al. Combined effects of living mulch and fertilizer reduction on nitrogen and phosphorus runoff loss in a citrus orchard[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1358–1367.

# 生草覆盖及配合化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响

程子珍<sup>1</sup>, 范先鹏<sup>1</sup>, 夏颖<sup>1\*</sup>, 刘冬碧<sup>1</sup>, 谭勇<sup>2</sup>, 严昶<sup>2</sup>, 樊丹<sup>2</sup>, 廖贵新<sup>3</sup>, 胡磊磊<sup>3</sup>

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 国家农业环境潜江观测实验站, 湖北省农业面源污染防治工程技术研究中心, 农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站, 武汉 430064; 2. 湖北省农业生态环境保护站, 武汉 430070; 3. 宜都市农业农村局, 湖北 宜都 443300)

**摘要:**为探讨柑橘园生草覆盖及配合化肥减量对地表径流氮磷流失的影响,本研究于2014—2021年在湖北清江流域开展了连续7年的野外径流小区监测试验。在自然降雨条件下设置清耕对照(CK)、生草覆盖(KF)和生草覆盖配合化肥减量(BMP)3个处理,探讨生草覆盖及生草覆盖配合化肥减量对柑橘园周年及主要时期的地表径流量、氮磷流失量、氮磷浓度的影响。结果表明:与CK相比,KF和BMP处理均能显著降低柑橘园中的总氮(TN)和总磷(TP)流失量,且BMP处理效果更好,其中,KF处理TN和TP流失量分别降低48.2%和50.0%,BMP处理TN和TP流失量分别降低54.2%和57.1%,BMP对氮磷流失量的削减效果主要是生草覆盖所起的作用。与CK相比,KF和BMP处理径流量分别减少了44.3%和50.1%,产流系数分别降低了3.3个百分点和3.8个百分点;KF处理地表径流中TN和TP浓度分别降低了11.0%和14.1%,BMP处理地表径流TN和TP浓度分别降低了11.9%和18.8%。柑橘园氮磷流失风险期为4—8月,在6—7月暴雨施肥耦合期,BMP处理减排效果最好,TN和TP流失量分别降低了54.6%和64.4%,但仅比KF处理分别高2.7个百分点和6.9个百分点。研究表明,生草覆盖和生草覆盖配合化肥减量均能显著削减柑橘园地表径流氮磷流失量和地表径流量,且主要是通过生草覆盖降低地表径流量实现削减氮磷流失量,在氮磷流失风险期和暴雨施肥耦合期采取生草覆盖配合化肥减量措施能有效减少柑橘园地表径流氮磷流失。

**关键词:**生草覆盖;化肥减量;柑橘园;地表径流;氮磷流失风险期;暴雨施肥耦合期

中图分类号:S666

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)06-1358-10

doi: 10.13254/j.jare.2023.0169

## Combined effects of living mulch and fertilizer reduction on nitrogen and phosphorus runoff loss in a citrus orchard

CHENG Zizhen<sup>1</sup>, FAN Xianpeng<sup>1</sup>, XIA Ying<sup>1\*</sup>, LIU Dongbi<sup>1</sup>, TAN Yong<sup>2</sup>, YAN Chang<sup>2</sup>, FAN Dan<sup>2</sup>, LIAO Guixin<sup>3</sup>, HU Leilei<sup>3</sup>

(1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, National Station for Qianjiang Agro-Environment, Hubei Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control, Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China; 2. Hubei Agricultural Ecological Environment Protection Station, Wuhan 430070, China; 3. Yidu Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Yidu 443300, China)

**Abstract:** To investigate the effects of living mulch combined with fertilizer reduction on surface runoff nitrogen and phosphorus loss in citrus orchards, field runoff monitoring experiments were consecutively conducted in the Qingjiang River basin for 7 years from 2014 to

收稿日期: 2023-03-19 录用日期: 2023-04-24

作者简介: 程子珍(1993—), 女, 山东烟台人, 助理研究员, 从事农业面源污染监测与防控研究。E-mail: cilicheng@163.com

\*通信作者: 夏颖 E-mail: xiayinghappy105@163.com

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A2025); 湖北省农业科技创新中心项目(2021-620-000-001-015)

**Project supported:** Joint Fund Project of National Natural Science Foundation of China(U21A2025); Hubei Agricultural Science and Technology Innovation Center Project(2021-620-000-001-015)

2021. Three treatments were set: clean-tillage control (CK), living mulch (KF), and living mulch combined with fertilizer reduction (BMP) under natural rainfall conditions. The effects of living mulch and living mulch combined with fertilizer reduction on nitrogen and phosphorus runoff losses and the concentration of nitrogen and phosphorus in runoff were studied in a citrus orchard. Compared with CK, KF, and BMP significantly reduced total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) losses, and BMP produced better results. KF reduced TN and TP losses by 48.2% and 50.0%, respectively, while BMP reduced them by 54.2% and 57.1%, respectively. Thus, the reducing effects of BMP on nitrogen and phosphorus losses were mainly caused by living mulch. Compared with CK, KF and BMP reduced runoff by 44.3% and 50.1%, respectively, and the runoff coefficients decreased by 3.3 and 3.8 percentage points, respectively. At the same time, KF decreased the concentrations of TN and TP losses by 11.0% and 14.1%, respectively, and BMP by 11.9% and 18.8%, respectively. The high-risk period for nitrogen and phosphorus loss was from April to August, and BMP had the greater effect on TN and TP losses, reducing them by 54.6% and 64.4%, respectively, during the rainstorm-fertilization period from June to July. However, these reductions were only 2.7 and 6.9 percentage points higher, respectively, than those provided by KF. The results demonstrated that living mulch and living mulch combined with fertilizer reduction can both significantly decrease nitrogen and phosphorus runoff losses, and that living mulch reduced nitrogen and phosphorus losses by decreasing runoff. Therefore, using living mulch or living mulch combined with fertilizer reduction measures can efficiently reduce nitrogen and phosphorus loss during the high-risk and rainstorm-fertilization periods in citrus orchards.

**Keywords:** living mulch; fertilizer reduction; citrus orchard; runoff; nitrogen and phosphorus loss risk period; rainstorm and fertilization coupled period

降雨径流是引起土壤氮磷流失的重要原因,不同的土地利用方式是造成土壤氮磷流失的本质因素,由于施肥量过高、施肥不当<sup>[1]</sup>和缺乏管理措施<sup>[2]</sup>,坡地果园成为小流域中氮磷流失的主要土地利用方式之一<sup>[3-5]</sup>。坡地果园氮磷流失会造成果园土壤质量退化、生产力下降,且对周边水体水质安全造成影响。降雨量和降雨强度决定了地表径流发生时期和氮磷流失时期,生草覆盖被认为是果园防控水土流失和氮磷流失的重要措施<sup>[6-11]</sup>,在极端暴雨条件下采用生草覆盖可大幅减少径流发生量和泥沙产生量<sup>[12]</sup>。俞巧钢等<sup>[9]</sup>研究发现,在山地果园套种黑麦草分别减少了36.4%的径流量以及55.2%的总氮和58.5%的总磷流失量,Li等<sup>[11]</sup>也曾报道,在秭归柑橘园间作白三叶后土壤氮和磷流失量分别减少了35.5%和40.0%,同时土壤质量等级有所提升。然而,在实际生产中,果园中生草栽培种类多为冬春绿肥,以培肥地力为主(9—10月播种,次年3—4月刈割),如光叶苕子、紫云英、紫花苜蓿<sup>[8]</sup>、箭舌豌豆<sup>[9]</sup>、二月兰<sup>[10]</sup>等。由于降雨和施肥的季节性差异,柑橘园的地表径流氮磷流失风险期往往是在暴雨与施肥耦合期,而该时期冬季绿肥已刈割还田,地表裸露度增大,氮磷流失风险增加。从防控地表径流氮磷流失的角度识别地表径流主要发生时期和氮磷流失风险期及其驱动因子,并在风险期采取有效的生草栽培措施,对于精准防控氮磷流失尤为重要。

柑橘是巩固农民脱贫成果的重要支柱产业,2019年湖北省柑橘种植面积发展到23.3万 $\text{hm}^2$ <sup>[13]</sup>,基本形

成了三峡库区甜橙及长江、清江两岸优质宽皮柑橘两大特色产区,其中,清江是长江在湖北省内的第二大支流,清江两岸柑橘种植面积达2.0万 $\text{hm}^2$ ,占湖北省柑橘种植面积的8.6%。然而,由于人地矛盾突出,山多坡陡、清耕管理、暴雨集中、化肥用量高等问题叠加导致氮磷流失风险大<sup>[12-14]</sup>,威胁清江流域和长江水质安全。因此,明确清江流域柑橘园氮磷流失特征并探索适合的防控措施,对清江流域“一江清水东送”具有重要的意义。

地表径流氮磷流失由径流量和径流中的氮磷浓度共同作用,单一的径流拦截措施不足以解决柑橘园氮磷流失问题,生草覆盖配合化肥减量可以通过同时降低径流量和氮磷浓度来实现高效削减氮磷流失。本研究通过在坡地柑橘园设置野外径流小区试验,连续7年监测柑橘园地表径流产流和氮磷流失特征,探讨单一生草覆盖与生草覆盖配合化肥减量2种管理措施对柑橘园氮磷流失的影响,以为综合防控柑橘园养分流失提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本试验为长期定位试验,试验区位于湖北省宜都市五眼泉镇鸡头山村(111°22'E,30°23'N),如图1所示。试验区海拔103 m,属亚热带季风气候,全年平均降雨量1350 mm,年均气温16.7℃,无霜期273 d。土壤为典型的黄棕壤,土壤理化性质:pH值6.81,有机质含量12.9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量1.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷含量

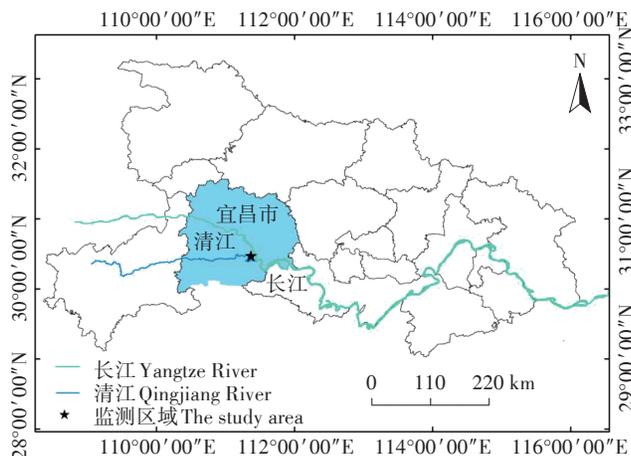


图1 研究区位置图

Figure 1 Position of the study area

4.4 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾含量 13.1 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷含量 55.7 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾含量 160.1 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验期限为2014年11月至2021年11月, 试验地坡度 14°, 品种为宜都蜜桔国庆1号, 移栽时树龄和冠幅保持一致。共设置清耕对照(CK)、生草覆盖(KF)和生草覆盖配合化肥减量(BMP)3个处理, 每个处理3次重复。CK处理耕作与当地常规操作一致, 不翻耕, 每年除草2次; 生草覆盖处理于每年4月种植黑麦草, 每年8月中旬收割除草后铺于树冠下。CK和KF处理全年施肥量为 N 890 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 338 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 450 kg·hm<sup>-2</sup>; BMP全年施肥量为 N 639 kg·hm<sup>-2</sup>、

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 225 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 450 kg·hm<sup>-2</sup>。所有处理氮、磷、钾肥均为一年施肥2次, 还阳肥在采果后15 d内施用(10月下旬至11月初), 占施肥量的60%; 壮果肥在6月下旬至7月初施用, 占施肥量的40%。施肥方法为沿树冠滴水线下开环状沟, 沟深20~30 cm, 施肥后覆盖。

试验小区长370 cm、宽300 cm, 面积11.1 m<sup>2</sup>, 每小区种植1株柑橘, 如图2所示。试验设3个处理3次重复, 随机区组排列。小区采用砖混结构浇砌而成, 小区间用15 cm厚的水泥挡板隔开, 挡板地下埋深30 cm、地上高20 cm, 以防各小区径流混合。采用径流池法收集地表径流, 在径流小区内布置PVC管接收径流液排入径流池。径流池采用砖混结构浇砌而成, 长250 cm、宽40 cm、深50 cm, 径流池上方采用彩钢盖板防止雨水和杂物进入。采用JQR-1型雨量计收集降雨, 并记录降雨量。

### 1.3 样品检测

每次降雨产流后, 收集混匀后的地表径流水样。每次采样前, 测量每个小区径流池地表径流水深, 根据水深计算各小区地表径流量。将径流池内的水样充分搅匀, 采集水样置于500 mL塑料瓶中, 放置于冰箱冷冻保存, 集中进行检测。测定指标为总氮(TN)、可溶性总氮(DTN)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)和可溶性总磷(DTP)。TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(HJ 636—2012), 水样经定性滤纸过滤后, 测定DTN, 测定方法

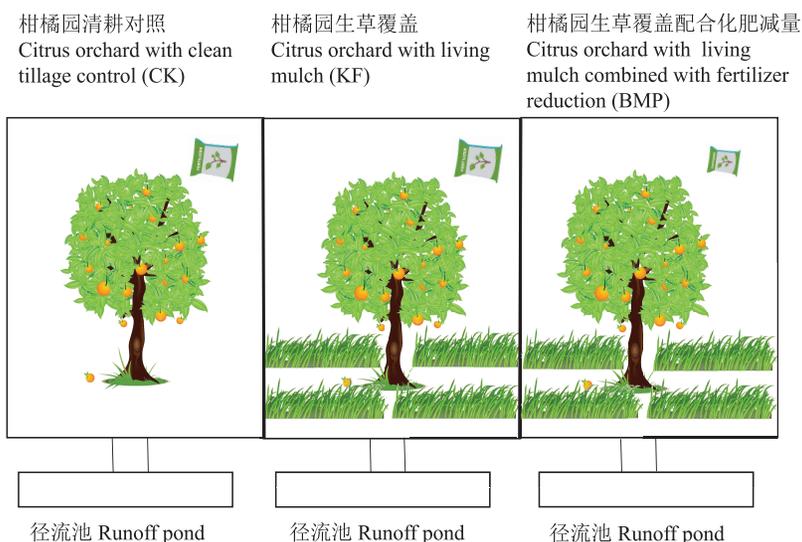


图2 试验设计图

Figure 2 The layout of the experimental plots

与总氮相同;NO<sub>3</sub>-N采用紫外分光光度法测定(HJ/T 346—2007);NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用靛酚蓝比色法测定;颗粒态氮(PN)用TN和DTN差减计算获得;可溶性有机氮(DON)用DTN与NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N差减计算获得。TP采用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893—1989),水样经0.45 μm微孔滤膜过滤后,测定可溶性总磷(TDP),测定方法与总磷相同;颗粒态总磷(PP)用TP与DTP差减计算获得。

#### 1.4 数据统计分析

采用SPSS 18.0软件对数据进行统计分析,数据符合正态分布,处理间的差异显著性采用最小显著性差异法(LSD)分析,数据制图采用Origin 2018。

## 2 结果与分析

### 2.1 生草覆盖和化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响

#### 2.1.1 对周年氮磷流失量和流失形态的影响

监测期间不同处理年均氮、磷流失量如表1和表2所示,CK、KF和BMP处理的TN流失量分别为3.01、1.56 kg·hm<sup>-2</sup>和1.38 kg·hm<sup>-2</sup>,TP流失量分别为0.42、0.21 kg·hm<sup>-2</sup>和0.18 kg·hm<sup>-2</sup>,TN和TP流失量均表现为CK>KF>BMP。在柑橘园中采取生草覆盖和生草覆盖配合化肥减量措施均能够显著降低氮磷流失量,与CK处理相比,KF处理TN和TP流失量分别显著降低48.2%和50.0%,BMP处理TN和TP流失量分别显著降低54.2%和57.1%。与KF处理相比,BMP处理的TN和TP流失量虽然分别降低了11.5%和14.3%,但两处理间差异不显著。

通过分析不同形态氮磷流失量发现,CK处理DTN、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和PN分别为2.66、1.40、0.63 kg·hm<sup>-2</sup>和0.35 kg·hm<sup>-2</sup>(表1),氮素流失以DTN为主,占TN的88.4%。生草覆盖通过同时降低NO<sub>3</sub>-N和PN削减氮素流失,与CK处理相比,KF处理DTN、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和PN的流失量分别降低了47.0%、

48.6%、41.3%和57.1%。同时,KF处理的PN占比降低了2.0个百分点,表明生草覆盖对地表径流颗粒态氮的削减效果较好。由表2可知,CK处理DTP和PP的流失量分别为0.20 kg·hm<sup>-2</sup>和0.22 kg·hm<sup>-2</sup>,流失的磷素中TDP和PP基本各占一半,其中,PP稍高于TDP,占比为52.4%。生草覆盖通过同时降低可溶性总磷和颗粒态磷实现削减磷素流失,KF处理能够显著降低不同形态磷素的流失量,与CK处理相比,KF处理DTP和PP的流失量分别降低了45.0%和54.5%。同时,KF处理的PP占比降低了4.8个百分点,表明生草覆盖对地表径流中颗粒态磷的削减效果较好。与KF处理相比,BMP处理对不同形态氮磷的削减没有达到显著性水平。

表2 地表径流中各形态磷年均流失量及所占比例

Table 2 Average annual phosphorus loss amount and proportion of various forms of phosphorus on surface runoff

处理 Treatment	不同形态磷流失量 Different forms of phosphorus loss amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )			不同形态磷流失比例 Ratio of phosphorus loss in different forms/%	
	TP	DTP	PP	TDP/TP	PP/TP
CK	0.42±0.20a	0.20±0.13a	0.22±0.16a	47.6	52.4
KF	0.21±0.08b	0.11±0.06b	0.10±0.06b	52.4	47.6
BMP	0.18±0.07b	0.10±0.06b	0.08±0.03b	55.6	44.4

#### 2.1.2 对风险期内地表径流氮磷流失的影响

图3和图4显示,柑橘园地表径流氮磷流失风险期为4—8月,该时期CK处理TN和TP流失量分别为2.1 kg·hm<sup>-2</sup>和0.3 kg·hm<sup>-2</sup>,分别占全年的70.0%和73.4%。与CK处理相比,在流失风险期,KF处理的TN和TP流失量分别降低了41.1%和47.4%,BMP处理分别降低了46.6%和52.3%,BMP处理削减效果最好。在6—7月柑橘园施壮果肥时期,也是暴雨与施肥耦合期,该时期CK处理TN和TP流失量分别为0.87、0.15 kg·hm<sup>-2</sup>,分别占全年的29.0%和35.0%。与CK处理相比,在暴雨与施肥耦合期,KF处理的TN和

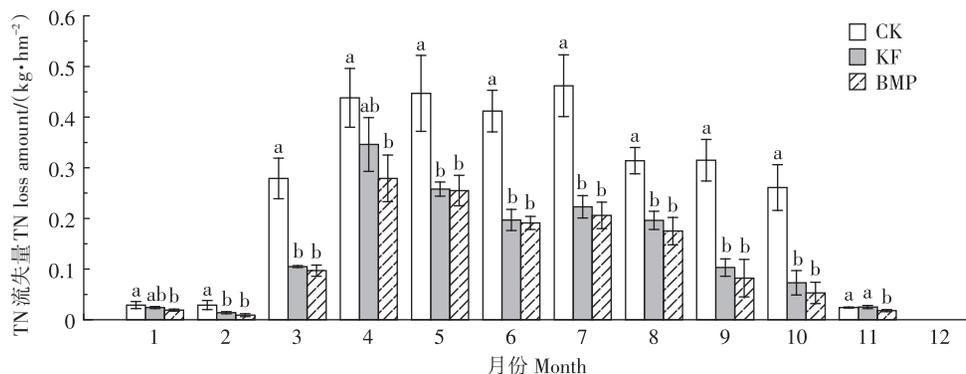
表1 地表径流中各形态氮年均流失量及所占比例

Table 1 Average annual nitrogen loss amount and proportion of various forms of nitrogen on surface runoff

处理 Treatment	不同形态氮流失量 Different forms of nitrogen loss amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )					不同形态氮流失比例 Ratio of nitrogen loss in different forms/%			
	TN	DTN	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	PN	DTN/TN	NO <sub>3</sub> -N/TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/TN	PN/TN
CK	3.01±1.63a	2.66±1.58a	1.40±0.88a	0.63±0.30a	0.35±0.18a	88.4	46.5	20.9	11.6
KF	1.56±0.61b	1.41±0.59b	0.72±0.37b	0.37±0.16b	0.15±0.11b	90.4	46.2	23.7	9.6
BMP	1.38±0.55b	1.22±0.50b	0.71±0.38b	0.35±0.16b	0.16±0.12b	88.4	51.4	25.4	11.6

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图3 不同管理措施下地表径流月均TN流失量

Figure 3 Average monthly TN loss amount on surface runoff under different management measures

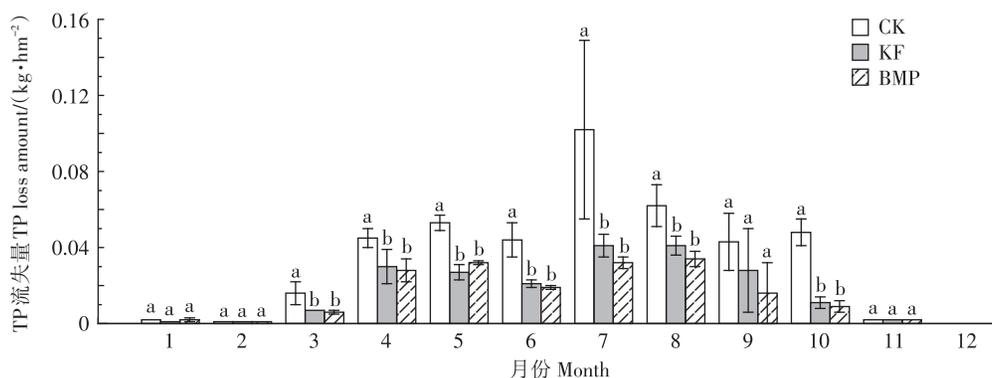


图4 不同管理措施下地表径流月均TP流失量

Figure 4 Average monthly TP loss amount on surface runoff under different management measures

TP流失量分别降低了51.9%和57.5%,BMP处理分别降低了54.6%和64.4%,但是BMP处理仅比KF处理分别高2.7个百分点和6.9个百分点。与KF处理相比,在流失风险期,BMP处理的TN和TP流失量仅分别降低了7.7%和4.0%;在暴雨与施肥耦合期,BMP处理的TN和TP流失量分别降低了7.0%和13.6%,两处理间差异均不显著。以上结果表明,在柑橘园氮磷流失风险期,尤其是在暴雨与施肥耦合期,生草覆盖配合化肥减量可以起到很好的地表径流氮磷流失防控效果,生草覆盖的效果好于化肥减量。

## 2.2 生草覆盖和化肥减施对柑橘园产流特征的影响

### 2.2.1 柑橘园降雨特征

由表3可知,监测期间年降雨量在667~1 706 mm之间,年均降雨量为1 022 mm。图5显示,试验区降雨量主要集中在3—10月,占全年降雨量的87.5%,其中,4—10月降雨量占全年降雨量的76.5%,6—7

月降雨量占全年降雨量的39.6%。由表3可知,试验区年际间降雨分布不均,2015年和2019年为少雨年份,年降雨量分别只有667 mm和738 mm,2017年和2020年为多雨年份,降雨量分别达到了1 264 mm和1 706 mm。

按照《降水量等级》(GB/T 28592—2012)对降雨量进行不同等级划分及筛选(小雨:24 h降雨量0.1~9.9 mm;中雨:24 h降雨量10.0~24.9 mm;大雨:24 h降雨量25.0~49.9 mm;暴雨:24 h降雨量50.0~99.9 mm;大暴雨:24 h降雨量100.0~149.9 mm),7年不同等级降雨累计次数如图6所示,中雨、大雨和暴雨主要集中在3—10月,累计次数分别为37、39和51次,分别占81%、92%和96%,大暴雨主要集中在4—8月,累计次数为7次,占比78%。

### 2.2.2 周年产流量和产流系数

表3表明,柑橘园径流量和产流系数年际差异较

表3 监测期间不同管理措施下地表径流发生特征

Table 3 Surface runoff characteristics under different management measures during the period of monition

监测年度 Year	处理 Treatment	产流次数 Runoff frequency	降雨量 Rainfall/mm	径流量 Runoff/mm	产流系数 Runoff coefficient/%
2015	CK	13	667	46.7a	7.0a
	KF			26.6b	4.0b
	BMP			24.5b	3.7b
2016	CK	10	911	60.6a	6.7a
	KF			40.3b	4.4b
	BMP			36.0c	3.9c
2017	CK	17	1 264	202.7a	16.0a
	KF			52.7b	4.2b
	BMP			39.3b	3.1b
2018	CK	9	899	52.4a	5.8a
	KF			44.8a	5.0a
	BMP			40.7a	4.5a
2019	CK	9	738	45.2a	6.1a
	KF			30.7b	4.2b
	BMP			28.5b	3.9b
2020	CK	22	1 706	109.4a	6.4a
	KF			82.3b	4.8b
	BMP			77.8b	4.6b
2021	CK	20	969	61.3a	6.3a
	KF			44.9b	4.6b
	BMP			41.9b	4.3b
均值	CK	14±5	1 022±357	82.6±57.3a	7.8±3.7a
	KF			46.0±18.3b	4.5±0.4b
	BMP			41.2±17.4b	4.0±0.5b

大,CK处理径流量范围在45.2~202.7 mm之间,产流系数介于5.8%~16.0%,值得注意的是,年径流量没有随着年降雨量的增加而增加,如2017年降雨量为

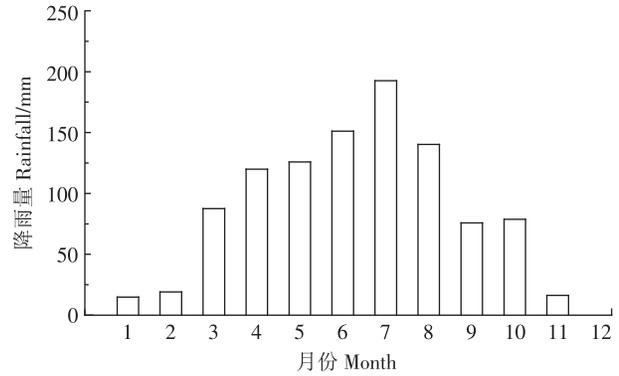


图5 监测期间月均降雨量

Figure 5 Average monthly rainfall during the period of monitoring

1 264 mm,径流量为202.7 mm,而2020年降雨量达到了1 706 mm,径流量仅109.4 mm。分析产流时段降雨量对径流量的影响,结果(图7)表明,柑橘园历次径流量与同期降雨量呈极显著正相关( $R^2=0.312 0^{**}$ ,  $n=300$ ),虽然降雨量达到10.9 mm时产生了径流,但是径流主要发生在降雨量大于50 mm时。

CK处理年均径流量和产流系数分别为82.6 mm和7.8%,生草覆盖可显著降低柑橘园的径流量和产流系数,与CK相比,KF处理的径流量和产流系数分别降低了44.3%和3.3个百分点,特别是在2017年丰水年,生草覆盖拦截了74.0%的径流量,但是生草覆盖减流效果并不是随着降雨量的增大而增强,在2020年特大降雨年份时,径流量仅降低了24.8%。BMP处理对径流量的削减效果与KF处理类似,与CK处理相比,BMP处理的径流量和产流系数分别降低了50.1%和3.8个百分点。然而,化肥减量对径流量和产流系数的削减效果有限,与KF处理相比,BMP处理的径流量和产流系数分别降低10.4%和0.5个百

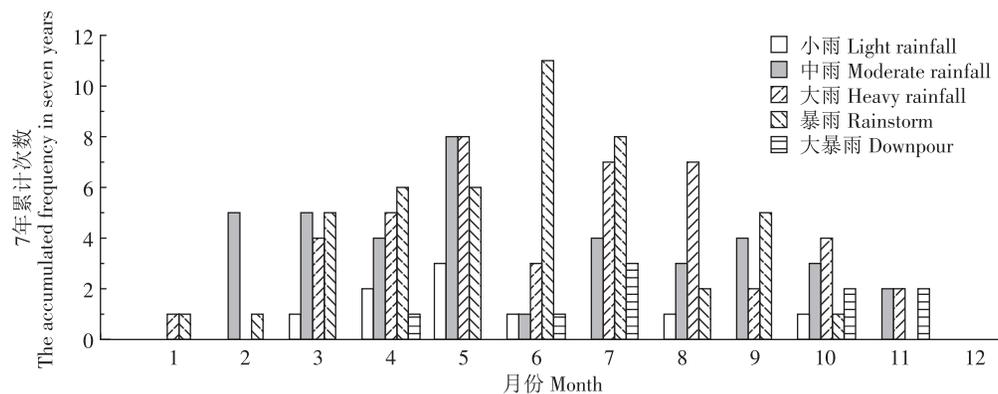
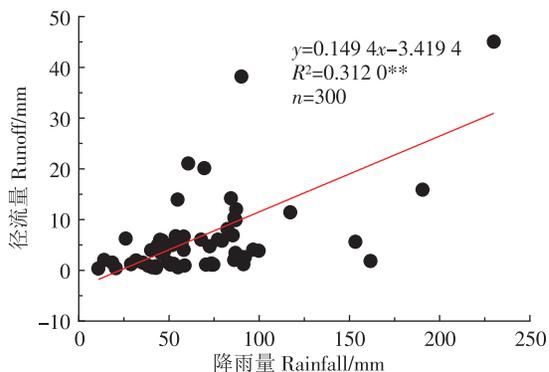


图6 监测期间不同等级降雨累计次数

Figure 6 Accumulated rainfall frequency at different levels during the period of monitoring



\*\*表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。  
\*\*indicates a significant correlation ( $P < 0.01$ ).

图7 历次径流量与同期降雨量的相关性

Figure 7 Correlation between runoff and rainfall in the same period

分点,但是两处理没有达到显著性差异水平(2016年除外)。

### 2.2.3 主要产流时期径流量

监测期间柑橘园主要产流时期为4—10月,该时期地表径流量达到了78.5 mm,占全年的95.0%(图8)。KF处理在主要产流时期内对径流量的削减效果好于其他时期,在4—10月期间,KF处理比CK处理的产流量降低44.6%,其他时期比CK处理降低37.4%。与CK相比,BMP处理在4—10月削减了50.7%的径流量,与KF处理相比,BMP处理在4—10月削减了11.0%径流量,但差异不显著,表明化肥减量并不能显著降低主要时期的径流量,生草覆盖对径流量的削减作用更大。

### 2.3 生草覆盖和化肥减量对柑橘园地表径流氮磷浓度的影响

不同处理年均TN和TP浓度如图9所示,CK处理TN年均浓度为 $(3.84 \pm 0.78) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,TP年均浓度为

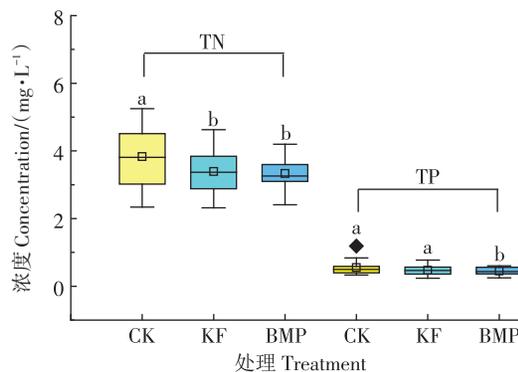


图9 不同管理措施下地表径流年均TN和TP浓度

Figure 9 Average annual TN and TP concentration on surface runoff under different management measures

$(0.55 \pm 0.14) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。生草覆盖和化肥减量均对地表径流氮磷流失浓度有削减作用,与CK处理相比,KF处理TN和TP浓度分别降低了11.0%和14.1%,BMP处理TN和TP浓度分别降低了11.9%和18.8%。与KF处理相比,化肥减量对TN浓度的降低效果不显著,但是对TP浓度的降低效果显著,BMP处理TN和TP浓度分别降低了1.1%和5.4%。

## 3 讨论

### 3.1 生草覆盖和化肥减量对柑橘园周年地表径流氮磷流失量的影响

Xia等<sup>[15]</sup>总结了坡地柑橘园防控地表径流氮磷流失的多种保护措施,其中,多年生白三叶草间作、秸秆覆盖、黄花菜等高篱间作等措施均能有效减少径流量和氮、磷流失量,分别使年径流量减少9%、13%和25%,氮损失减少10%、23%和36%,磷损失减少39%、31%和27%,这些保护措施主要是通过增加地表覆盖度,对地表径流进行缓冲,降低其地表流速和流量,从而减少土壤侵蚀和地表径流养分流失<sup>[16]</sup>。然

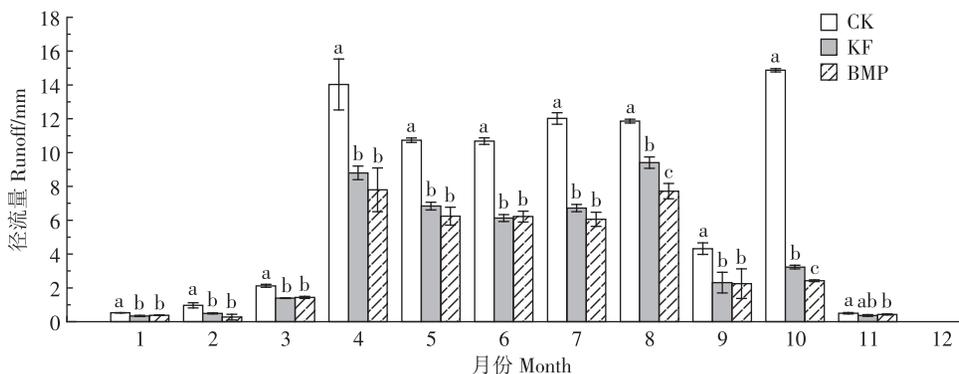


图8 不同管理措施下地表径流流失量

Figure 8 Average monthly surface runoff loss under different management measures

而,由于土壤类型和覆盖物的差异,不同覆盖措施对氮磷流失削减的效果不同。在粗黄砂土上种植光叶苕子、白三叶和鼠茅草,这3种不同生育周期的绿肥品种对氮磷的削减效果表现为鼠茅草>光叶苕子>白三叶<sup>[17]</sup>,在紫色土上黑麦草、光叶苕子和二月兰不同绿肥品种对氮磷的削减效果表现为黑麦草>光叶苕子>二月兰<sup>[10]</sup>,造成这种差异的原因主要是绿肥品种的生育周期不同导致对地表的覆盖度不同,在3—8月氮磷流失量高的时期二月兰已接近凋亡,使得地表裸露面积相当于清耕处理。故本研究采用生育周期相对较长且对氮磷流失防控较好的黑麦草作为覆盖作物。

同时,肥料施用量<sup>[18]</sup>和施肥方式<sup>[19]</sup>通过影响地表径流中氮、磷浓度,从而影响地表径流氮、磷流失。众多研究表明,地表径流氮磷养分流失取决于径流量及其相关的养分浓度<sup>[20]</sup>,这与本研究结果一致。本研究中,与清耕对照相比,生草覆盖处理TN和TP流失量分别降低48.2%和50.0%,径流量、年均TN和TP浓度分别降低了44.3%、11.0%和14.1%。在生草覆盖的基础上配合化肥减量效果更好,TN和TP流失量分别降低54.2%和57.1%,径流量、TN和TP浓度分别降低了50.1%、11.9%和18.8%。因此,在柑橘园中采取生草覆盖配合化肥减量是有效减少地表径流氮磷流失的重要管理措施。但是,与单一生草覆盖处理相比,生草覆盖配合化肥减量处理对氮磷流失的削减效果没有达到显著水平,主要是由于径流量在决定氮磷流失量方面比氮磷浓度发挥更主要的作用<sup>[21]</sup>,同时,本试验中施肥方式采用的是环状根区深施,化肥减量对氮磷流失的减排效果不显著,说明在环状根区深施条件下,化肥用量不是影响氮磷流失的主要因素,这与毕磊等<sup>[22]</sup>在丹江口库区柑橘园的研究结果一致。

### 3.2 生草覆盖和化肥减量对柑橘园风险期地表径流氮磷流失量的影响

降雨是地表径流产生的驱动力,不同雨强下的降雨径流分配特征存在较大的差异,随雨强的增大,地表径流量明显增加<sup>[23]</sup>。相关研究表明,大雨时的径流量分别为中雨和小雨时的2.34倍和7.59倍<sup>[24]</sup>,极端降雨造成的径流和侵蚀量远大于普通降雨,极端降雨平均径流系数和土壤流失量分别是普通降雨的2.8倍和11.1倍<sup>[25]</sup>,表明地表径流的产生受降雨强度的影响。本研究发现柑橘园历次径流量与同期降雨量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),并且径流流失主要发生在降雨量大于50 mm时(主要集中在每年的4—10月),76.5%

的降雨量产生了95.0%的径流量,王宏等<sup>[26]</sup>的研究也证实了径流量与降雨量呈正相关关系。

然而,生草覆盖减流效果并不是随着降雨量的增大而增强,这是由于在极端降雨时,径流停留时间短,生草覆盖对极端降雨径流的拦截能力有限,张杰等<sup>[27]</sup>的结果证明在中雨时生草覆盖的减流效益最大,流失风险期主要是受暴雨时期的影响,这与本研究结果一致。在本研究中,降雨、径流、氮磷流失三个主要时期存在时间异质性,其中,降雨主要时期为3—10月,径流发生主要时期为4—10月,但是氮磷流失风险期为4—8月,这是因为大暴雨主要集中在4—8月,该时期74.4%的降雨量贡献了70.0%的TN流失量和73.4%的TP流失量,采取生草覆盖配合化肥减量可削减46.6%和52.3%。相关性分析证实(图7,表4),历次径流量、氮流失量与同期降雨量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。同时在6—7月,研究区39.6%的降雨量贡献了全年29.0%的TN流失量和35.0%的TP流失量,表明在暴雨和施肥耦合时期,除了受降雨径流的影响外,施肥也会增加氮磷流失风险,该时期同时采取生草覆盖和化肥减量措施能有效减少柑橘园氮磷流失风险期内54.6%的TN流失量和64.4%的TP流失量。因此,清江流域柑橘园应在氮磷流失风险期内采取生草覆盖措施,同时应避免暴雨时期施肥,并且注意施肥方式。

表4 氮磷流失量与同期降雨量相关性( $n=300$ )

Table 4 The correlation between nitrogen and phosphorus loss amount and rainfall in the same period( $n=300$ )

处理 Treatment	TN	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	TP
CK	0.257 3**	0.253 9**	0.160 5**	0.082 3

注:\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。

Note:\*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ).

## 4 结论

(1)生草覆盖配合化肥减量可显著降低柑橘园54.2%的TN流失量和57.1%的TP流失量。生草覆盖主要通过削减径流量实现降低地表径流氮磷流失,在化肥环状深施条件下,化肥减量对降低径流中的氮磷浓度效果有限。

(2)柑橘园氮磷流失风险期为4—8月,该时期74.4%的降雨量贡献了70.0%的TN流失量和73.4%的TP流失量,采取生草覆盖配合化肥减量可削减46.6%和52.3%。在6—7月暴雨和施肥耦合期,采取生草覆盖配合化肥减量措施对氮磷流失的削减效果

更好,能有效减少柑橘园地表径流54.6%的TN流失量和64.4%的TP流失量。柑橘园应重点防控氮磷流失风险期,尤其是暴雨和施肥耦合时期,在该时期应采取生草覆盖措施配合化肥减量深施。

#### 参考文献:

- [1] 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].水土保持学报,2021,37(11):95-102. WANG X R, TANG W P, FU T, et al. Effects of different management practices on soil nutrients and nitrogen and phosphorus losses with runoff of citrus orchards in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 37(11):95-102.
- [2] 钱婧,张丽萍,王小云,等.人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):6-10. QIAN J, ZHANG L P, WANG X Y, et al. Effects of different slope length and vegetation coverage on nitrogen loss in sloping land under artificial simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5):6-10.
- [3] 陈志良,程炯,刘平,等.暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):30-33. CHEN Z L, CHENG J, LIU P, et al. An experiment on influence of storm on nitrogen loss and phosphorus loss under different land use in river basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5):30-33.
- [4] 袁兴程,钱新,庞宗强,等.不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究[J].环境化学,2011,30(9):1657-1662. YUAN X C, QIAN X, PANG Z Q, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss from surface soil in different landuse[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(9):1657-1662.
- [5] 邓华,高明,龙翼,等.石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J].环境科学,2021,42(1):251-262. DENG H, GAO M, LONG Y, et al. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different landuse schemes in the Shipanqiu watershed [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1):251-262.
- [6] 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, 368:393-406.
- [7] CERDA A, MORERA G A, BODI M B, et al. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(13):1822-1830.
- [8] 唐红琴,李忠义,曾成城,等.不同绿肥种类和还田量对柑橘园土壤养分的动态影响[J].江苏农业科学,2021,49(16):214-219. TANG H Q, LI Z Y, ZENG C C, et al. Dynamic characteristics of decomposition and nutrient release under green manure mulching in citrus orchard[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2021, 49(16):214-219.
- [9] 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):6-9. YU Q G, YE J, MA J W, et al. Effects of green manure planting on nitrogen and phosphorus runoff losses in mountain orchards[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):6-9.
- [10] 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 R, ZHANG Y T, WANG Z C, 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.
- [11] LI H Y, ZHU N Y, WANG S C, et al. Dual benefits of long-term ecological agricultural engineering: mitigation of nutrient losses and improvement of soil quality[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721:1-11.
- [12] DUAN J, LIU Y J, YANG J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582:1-10.
- [13] 湖北省统计局.2019湖北农村统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2020:108. Hubei Provincial Bureau of Statistics. Rural statistical yearbook of Hubei Province in 2019[J]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2020:108.
- [14] WU X L, WEI Y J, WANG J G, et al. Effects of soil type and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-south China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621:54-66.
- [15] XIA L Z, LIU G H, WU Y H, et al. Protection methods to reduce nitrogen and phosphorus losses from sloping citrus land in the Three Gorges area of China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(3):478-488.
- [16] MU H L, YU X J, FU S H, et al. Effect of stem cover on hydraulic parameters of overland flow[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577:1-12.
- [17] 栾好安,王晓雨,韩上,等.三峡库区橘园种植绿肥对土壤养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):68-72. LUAN H A, WANG X Y, HAN S, et al. Effects of green manure planting on loss of soil nutrient in citrus orchard in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):68-72.
- [18] 罗照霞,杨志奇,马忠明,等.不同农作措施对黄绵土坡耕地地表径流养分流失及玉米产量的影响[J].中国水土保持,2015(7):34-37. LUO Z X, ZHANG Z Q, MA Z M, et al. Effects of different agricultural practices on surface runoff nutrient loss and maize yield in sloping farmland of loessal soil[J]. *Chinese of Soil and Water Conservation*, 2015(7):34-37.
- [19] 张富林,刘冬碧,范先鹏,等.农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):858-866. ZHANG F L, LIU D B, FAN X P, et al. Effects of agronomic deep application and combined application of controlled release nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen loss in a paddy field [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5):858-866.
- [20] GUO S F, ZHAI L M, LIU J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmland in southern hilly regions of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191:48-56.
- [21] 严坤,王玉宽,刘勤,等.三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷[J].环境科学,2020,41(8):3646-3656. YAN K, WANG Y K, LIU Q, et al. Dynamic process of nitrogen and phospho-

- rus export and loss load in an intensive orchard with ridge and furrow plantation in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8):3646-3656.
- [22] 毕磊, 谭启玲, 胡承孝, 等. 养分管理措施对丹江口库区橘园氮磷流失的影响[J]. 华中农业大学学报, 2011, 30(4):474-478. BI L, TAN Q L, HU C X, et al. Effects of nutrient management on loss of nitrogen and phosphorus from citrus orchard of Danjiangkou Reservoir area[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2011, 30(4):474-478.
- [23] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):2151-2158. CHEN L, LIU D F, SONG L X, et al. Characteristics of nutrient loss by runoff in sloping arable land of yellow brown under different rainfall intensities[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6):2151-2158.
- [24] 梁雯雯, 蒋先军, 袁俊吉, 等. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):81-85. LIANG W W, JIANG X J, YUAN J J, et al. Main features of the loss of nitrogen and phosphorus and rainfall intensity influence in the slope farmland of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):81-85.
- [25] WEI W, CHEN L D, FU B J, et al. Responses of water erosion to rainfall extremes and vegetation types in a loess semiarid hilly area, NW China[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(12):1780-1791.
- [26] 王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. 环境科学, 2020, 41(10):4547-4554. WANG H, XU Y L, ZHANG Q, et al. Emission characteristics of nitrogen and phosphorus in a typical agricultural small watershed in Tuojiang River basin[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10):4547-4554.
- [27] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24):165-173. ZHANG J, CHEN X A, TANG C J, et al. Benefits evaluation on typical soil and water conservation measures in citrus orchard on red soil slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(24):165-173.