

DOI: 10.11766/trxb202010200584

李红颖, 王思楚, 高孟宁, 夏立忠, 韩庆忠, 王青龙, 吴永红. 渗漏是三峡库区砂质土橘园氮磷流失的主要途径[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 1078–1088.

LI Hongying, WANG Sichu, GAO Mengning, XIA Lizhong, HAN Qingzhong, WANG Qinglong, WU Yonghong. Leaching is the Main Pathway of Nitrogen and Phosphorus Losses for Citrus Orchards with Sandy Soil in Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1078–1088.

## 渗漏是三峡库区砂质土橘园氮磷流失的主要途径\*

李红颖<sup>1, 2, 3</sup>, 王思楚<sup>1, 2, 3</sup>, 高孟宁<sup>1, 2, 3</sup>, 夏立忠<sup>1, 2†</sup>, 韩庆忠<sup>4</sup>, 王青龙<sup>4</sup>,  
吴永红<sup>1, 2</sup>

(1. 湖北秭归三峡库区生态系统水利部野外科学观测研究站, 湖北秭归 443600; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖北省秭归县农业技术推广中心, 湖北秭归 443600)

**摘要:** 过量施肥引起的氮磷流失是影响三峡库区水环境的重要因素。以三峡库区砂质土生草覆盖梯田橘园为研究对象, 开展了不同施肥水平下的小区试验, 连续 2 年对地表径流和渗漏液中的氮磷流失情况进行了观测。结果表明: (1) 小区水分主要通过渗漏流失, 地表径流系数低, 土壤侵蚀弱。(2) 深穴埋施肥对地表径流氮磷流失无显著影响。(3) 渗漏损失是小区氮磷流失的主要途径, 分别占全氮和全磷总流失量的 99.0% 和 76.9%。(4) 氮磷流失量占施肥量的 34.5% 和 6.4%, 其中渗漏流失的氮磷分别占施肥量的 34.3% 和 5.1%。(5) 施肥引起的渗漏液氮流失量 ( $y$ ) 随着施肥量 ( $x$ ) 的增多而增大, 二者具有极显著的线性相关关系 ( $y=0.35x-5.77$ ,  $P<0.01$ ); 而施肥引起的渗漏液磷流失量与施肥量无显著的相关性 ( $P=0.05$ ), 主要因为一部分磷肥被根系利用, 大部分残余的磷肥被耕层土壤吸附, 仅有少量磷肥下渗至深层土壤, 并且建园改土深层残余磷素对渗漏磷流失产生了影响。可见, 砂质土梯田橘园养分渗漏流失, 尤其是氮渗漏流失需要足够关注, 养分管理需进一步优化, 以减少流失, 实现高效利用。

**关键词:** 砂质土; 橘园; 养分流失; 面源污染途径; 三峡库区

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

## Leaching Is the Main Pathway of Nitrogen and Phosphorus Losses for Citrus Orchards with Sandy Soil in Three Gorges Reservoir Area

LI Hongying<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Sichu<sup>1, 2, 3</sup>, GAO Mengning<sup>1, 2, 3</sup>, XIA Lizhong<sup>1, 2†</sup>, HAN Qingzhong<sup>4</sup>, WANG Qinglong<sup>4</sup>,  
WU Yonghong<sup>1, 2</sup>

(1. Zigui Three Gorges Reservoir Ecosystem, Observation and Research Station of Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Zigui, Hubei 443600, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Zigui Agriculture Technology Extension Centre, Zigui, Hubei 443600, China)

\* 国家自然科学基金项目 (31572211) 和国家重点研发计划项目 (2017YFD0202002) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31572211) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0202002)

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

作者简介: 李红颖 (1991—), 女, 河北唐山人, 博士研究生, 主要从事农业资源利用与环境效应研究。E-mail: hyli@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-10-20; 收到修改稿日期: 2021-02-26; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-04-01

**Abstract:** 【Objective】 Citrus production is one of the main income of farmers in the Three Gorges Reservoir area. The loss of nitrogen and phosphorus caused by excessive fertilizer in the Three Gorges Reservoir area presents negative impacts on the aquatic environment. 【Methods】 In this study, sandy soil citrus orchard with natural grass mulching was chosen. The amount of nitrogen and phosphorus loss from surface runoff and leaching was observed for two consecutive years by plot experiment at six levels of fertilization. The pathways of nitrogen and phosphorus losses in the citrus orchard and the effects of different fertilization levels on nitrogen and phosphorus losses were investigated. Seven treatments were set in the experimental plot, with an average row and plant spacing of 4.7 m × 3.4 m; with no fertilizer application (T1) as the control, the application rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer for the T3, T4, T5, T6 and T7 treatments were 1.67, 2.33, 3.00, 3.67 and 4.33 times those of T2, respectively. During the growth season of navel orange in 2016—2017, rainfall and atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus were monitored. Surface runoff water, sediment, and infiltration water were sampled for total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) content. 【Results】 Under the ecological protection mode of grass mulching, the surface runoff and soil erosion were effectively controlled. The main pathway of water loss in the rain-fed citrus orchard was leaching with a low coefficient of surface runoff and weak soil erosion. During the study period, the rainfall loss by seepage accounted for 48.9% of the rainfall, and the surface runoff only accounted for 1.73% of the rainfall. The amount of fertilization applied in deep furrow had no effect on the amount of nitrogen and phosphorus loss from the surface runoff. Leaching was the main pathway of nitrogen and phosphorus loss. The average leaching loss of total nitrogen and total phosphorus accounted for 99.0% and 76.9% of the total loss of nitrogen and total phosphorus respectively. Also, the amount of nitrogen loss ( $y$ ) by seepage increased with the increase of application rates ( $x$ ), and there was a significant linear correlation between them ( $y = 0.35x - 5.77$ ,  $P < 0.01$ ). However, no significant correlation existed between the amount of phosphorus loss and application rates ( $P = 0.05$ ). Also, only a small amount of phosphorus can be leached to the bottom of the soil after the roots uptake and soil particles adsorption in up layers. Moreover, the residual phosphorus in the deep soil, after deep plough before citrus planting, had an impact on the leakage of phosphorus. 【Conclusion】 The problem of nutrient loss, leaching nitrogen loss in citrus orchards, in particular, should be given more attention. To reduce nutrient loss and achieve efficient utilization, nutrient management should be further optimized.

**Key words:** Sandy soil; Citrus orchards; Nutrient loss; Pathways of non-point pollution; The Three Gorges Reservoir area

以三峡库区为核心的长江中上游沿江区域是我国重要的柑橘产地之一<sup>[1]</sup>，库区柑橘产量高，品质好。随着三峡工程的兴建和库区农业结构的调整与优化，作为传统名特优农产品，柑橘的种植得到了广泛的推广。库区柑橘的种植面积从 1998 年的 2.5 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>增加至 2017 年的 9.3 万  $\text{hm}^2$ <sup>[3]</sup>。柑橘产业的发展提高了部分库区农村移民的经济收入，促进了区域农业的发展，真正实现了移民“安得稳，逐步能致富”的目标<sup>[4]</sup>。然而，由于三峡库区坡耕地坡度较陡，水土流失严重，生态环境退化剧烈，土壤普遍砂质化，养分贫瘠<sup>[5-6]</sup>。另一方面，由于传统的有机肥生产萎缩，施用化肥满足柑橘增产需求成为橘农的倾向性选择。目前库区橘园施肥出现严重的供大于需<sup>[7-8]</sup>。有研究<sup>[9]</sup>表明，目前库区橘园氮磷钾的投入量分别达到 678  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、450  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和 572  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而推荐的氮磷钾施肥量范围为 250~350  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、150~200  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和 150~250  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[10]</sup>。

化肥大量施用加上自然雨养条件下土壤水肥难以协调供应，使得肥料的养分利用率低，养分大量流失<sup>[11]</sup>。柑橘产区已成为三峡库区氮磷农业面源污染的主要来源地之一<sup>[12]</sup>。并且长期过量施用化肥会降低土壤 pH，不利于土壤的可持续利用<sup>[13]</sup>。

我国已有农田养分流失研究多针对周年或季节性的农作物<sup>[14-15]</sup>。柑橘产业近 20 多年在我国得到区域性规模化发展，而国内相关研究开展相对滞后。目前柑橘园的研究主要集中在地表径流氮磷流失规律和保护性植被控制水土流失<sup>[16-17]</sup>，对施肥量与氮磷流失量的关系尤其是有关柑橘园氮磷渗漏流失的研究，尚未见系统野外观测与准确分析。本研究采用野外定点小区试验的方法，选择三峡库区砂质土梯田橘园，观测自然降雨条件下，柑橘园地表径流、渗漏的形成特征，进一步研究不同施肥水平对柑橘园氮磷地表径流和渗漏流失的影响。研究结果不仅可为当地农民和技术部门优化柑橘园养分管理、控

制氮磷面源污染提供依据, 且为今后其他类型果园的可持续管理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点和野外布 设

试验点位于三峡库首的湖北省秭归县茅坪镇九里村 (110°57'51.9" E, 30°48'21.8" N)。地处亚热带湿润季风气候, 年平均气温 16~19℃, 降水量 1 100 mm 左右<sup>[18-19]</sup>。海拔 245 m, 自然坡度 28°。选择的橘园地为三峡库区普遍的陡坡地人工梯田, 供试土壤为中性结晶岩黄壤, 土壤平均土层厚度为 50 cm, 其基本理化指标见表 1。该类岩土构型的土壤在我国南方柑橘产区均有一定分布, 其薄层化、砂质化和贫营养化代表了三峡库区退化山地土壤的典型特征。

试验选择的柑橘品种为枸橘砧弗罗斯特, 定植于 2001 年, 树龄 15 年。柑橘树体处于树势扩展与结果同步期, 植株间无枝叶交叉。在定植前为改善根际土壤性状, 提高底层土壤养分水平, 采用表土深翻, 将养分含量较丰富的表层土壤深翻入底; 并在离地面 50 cm 处施用一层鸡粪, 平均每棵树施用 20 kg。选择土壤条件、植株长势一致的个体作为试验用树, 共选择 3 排梯田 21 棵。每个处理的田面坡度保持一致。试验小区设置 7 个处理, 3 个重复, 平均行株距为 4.7 m×3.4 m。其中 T1 处理为不施肥对照小区。T2、T3、T4、T5、T6 和 T7 处理小区的氮磷钾施肥量如表 2 所示。2016 年由于前期开花和着果量大, 未施肥。花期结束后, 于 5 月 18 日施用保果肥, 于 8 月 28 日施用果实膨大肥, 实际氮磷钾施肥量为设计处理施肥量的 75%;

2017 年分三次施肥, 分别为保果肥和 2 次果实膨大肥, 施肥时间分别为 3 月 15 日、6 月 15 日和 9 月 12 日。每次施肥均采用沿树冠滴水线环形挖沟 20 cm 施肥后覆土方法。脐橙园不施除草剂也不人工除草, 实行自然生草覆盖。

本试验于 2015 年 5 月开始野外布设。在垂直植株滴水线的地下 60 cm 深度位置埋设渗漏液收集装置 (图 1)。埋设时, 装置对应的地面面积和其对应的施肥区面积比与整个小区面积和小区施肥面积比保持一致。渗漏液收集装置为聚氯乙烯 (PVC) 板制成, 长、宽、深分别为 1 m、0.2 m、0.1 m 的长方体集水盒。集水盒底部与四周均由 PVC 板制成, 上部用不锈钢纱网封盖。为了便于塑料管吸出入渗径流水, 底部 PVC 板制成 V 字形; 在集水盒四周 PVC 板上部 9 cm 处嵌入 20 目不锈钢纱网, 纱网上部均匀布设厚度约 5 mm 的石英砂透水层, 石英砂上部覆土。在集水盒底部, 设置一个内径 5 mm 的硬质塑料管且引出地面, 用作渗漏液收集管, 采用抽真空吸入法收集渗漏液。在小区间埋设 50 cm 深的塑料板围隔 (地表 10 cm, 地下 40 cm), 控制相邻小区根部侧向入侵和输入的养分侧向迁移, 同时分隔各小区径流; 在梯田下沿, 在塑料板地上部分设置出水口, 由 PVC 管穿过桶盖引流至径流收集桶。在柑橘植株冠层上设置干湿沉降桶, 加 5 cm 深纯净水, 逐月计量桶内水量并采集水样, 分析全氮 (TN) 和全磷 (TP) 浓度并计算干湿沉降 TN 和 TP 总量。

采用 SPECTRUM 公司的 WatchDog 观测站, 实时观测干湿球温度、辐射、气压、风向、风速和降水量等气象数据和不同深度土壤含水量。WatchDog 的水分传感器分别安装于橘园内地下 5 cm、20 cm、

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

土壤类型 Soil type	pH	SOM /(g·kg <sup>-1</sup> )	TN /(g·kg <sup>-1</sup> )	AN /(mg·kg <sup>-1</sup> )	AP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK /(mg·kg <sup>-1</sup> )	机械组成 Soil texture/%		
							2~0.05 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
黄壤 <sup>①</sup>	5.3	12.03	0.66	92.05	11.70	48.45	85.30	9.68	5.02

注: SOM 代表有机质; TN 代表全氮; AN 代表碱解氮; AP 代表有效磷; AK 代表速效钾。机械组成采用激光衍射法测定 (Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Malvern, UK)。Note: SOM stands for soil organic matter; TN stands for total nitrogen; AN stands for alkaline nitrogen; AP stands for available phosphorus; AK stands for available potassium. The mechanical composition was determined by laser diffraction (Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Malvern, UK). ①Yellow soil.

表 2 不同处理小区的施肥量

Table 2 Fertilization amount in different treatment plots/ (kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	施肥量 Fertilizing amount	2016			2017			
		FC	ED	Tot	FC	ED	ED	Tot
T2	N	75.0	37.5	112.5	75.0	37.5	37.5	150.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	37.5	18.75	56.25	37.5	18.75	18.75	75.0
	K <sub>2</sub> O	37.5	75.0	112.5	37.5	37.5	75.0	150.0
T3	N	125.0	62.5	187.5	125.0	62.5	62.5	250.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	62.5	31.25	93.75	62.5	31.25	31.25	125.0
	K <sub>2</sub> O	62.5	125.0	187.5	62.5	62.5	125.0	250.0
T4	N	175.0	87.5	262.5	175.0	87.5	87.5	350.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	87.5	43.75	131.3	87.5	43.75	43.75	175.0
	K <sub>2</sub> O	87.5	175.0	262.5	87.5	87.5	175.0	350.0
T5	N	225.0	112.5	337.5	225.0	112.5	112.5	450.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	112.5	56.25	168.8	112.5	56.25	56.25	225.0
	K <sub>2</sub> O	112.5	225.0	337.5	112.5	112.5	225.0	450.0
T6	N	275.0	137.5	412.5	275.0	137.5	137.5	550.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	137.5	68.75	206.3	137.5	68.75	68.75	275.0
	K <sub>2</sub> O	137.5	275.0	412.5	137.5	137.5	275.0	550.0
T7	N	325.0	162.5	487.5	325.0	162.5	162.5	650.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	162.5	81.25	243.8	162.5	81.25	81.25	325.0
	K <sub>2</sub> O	162.5	325.0	487.5	162.5	162.5	325.0	650.0

注：FC 代表保果肥；ED 代表膨大肥，Tot 代表总量。Note: FC stands for fruit conserving fertilizer; ED stands for expanding fertilizer, Tot stands for total.

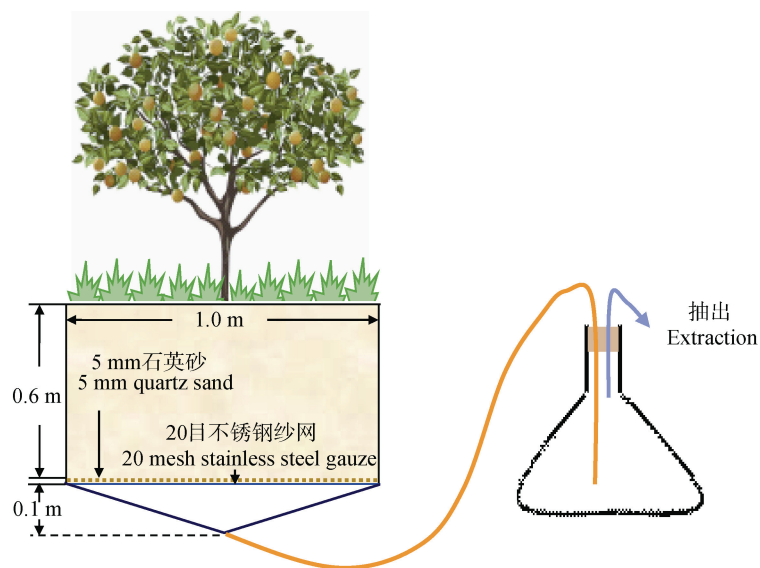


图 1 渗漏装置示意图

Fig. 1 Diagram of lysimeter and sampling system

30 cm、40 cm、60 cm 和 70 cm 深度，其中 60 cm 以上为土层，60 cm 以下为岩石或碎屑物。采用联合国粮食及农业组织（FAO）推荐的彭曼（Penman-Monteith）模型，利用气象参数计算参考作物蒸散量  $ET_0$ ，然后利用作物系数  $K_c$  对  $ET_0$  进行修正，获得柑橘生长需水  $ET_c$  [20]。本项试验橘园树龄 15 年，且保留园地杂草，植被覆盖稳定；而砂质土毛管上升水量低，表层土水势变化对蒸散发量影响小，因此采用成年橘园留草覆盖的标准状态下作物系数对蒸散发量加以修正，雨前和雨后的  $K_c$  值均为 0.8 [21]。逐日进行蒸散发量估算。

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (1)$$

阶段降雨渗漏量 ( $I$ ) 采用水分平衡的原理进行估算，公式如下：

$$I = P - ET_c - R - \Delta W \quad (2)$$

式中， $P$  为阶段降水量，mm； $ET_c$  为阶段蒸散发量，mm； $R$  为阶段地表径流量，mm； $\Delta W$  为阶段第一天与最后一天剖面土壤加权含水量的变化（mm），增高为正，降低为负。其中，地表径流量按次降雨产流读取；阶段降雨渗漏量按照式（2）进行计算。

## 1.2 样品采集和指标测定

降雨产流后，首先用标尺测量每个小区径流桶的水深，在每个径流桶不同位置测量三次取平均值，为最终的水深，根据径流桶直径计算地表径流量。然后将桶中水沙充分搅匀，采集 1 L 水沙混合样。待泥沙全部沉入桶底，将水排出，采集径流泥沙样，带至室内风干待测。

采集到的径流水沙混合样静置 30 min 后采集 250 mL 上清液用以测定 TN 和 TP 浓度，剩下的样品用滤纸过滤后，105℃ 烘干后称重测定泥沙含量 [22]。水体 TN 的测定采用碱性过硫酸钾消煮—紫外分光光度法 [23]，水体 TP 的测定采用过硫酸钾消煮—钼酸铵分光光度法 [24]，径流泥沙态 TN 的测定采用半微量凯氏法 [25]，泥沙态 TP 的测定采用硫酸-高氯酸消煮—钼锑抗比色法 [26]。

## 1.3 数据处理

经 Excel 2010 整理实验数据后，采用 SPSS 21.0 统计学分析软件对数据进行单因素方差分析，

最小显著差异方法（LSD）对数据进行多重检验和皮尔森相关性分析（Pearson correlation），采用 Origin2020 作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 橘园降雨产流与氮磷输入

降水产流是氮磷流失的驱动因子和载体，岩土结构的砂壤土不仅地表径流造成氮磷流失，入渗形成的渗漏在岩土交界面形成的侧向流也会带走氮磷等营养盐。观测表明，2016 年降水（表 3）通过渗漏流失量最多，占降水量的 53.0%；地表径流很低，仅占降水量的 1.4%。2017 年降水随渗漏流失占降水量的 44.8%，地表径流损耗的水量占 2.05%。已有的研究多在坡耕地上开展，试验土壤多为壤土或黏壤土，稳定入渗率相对较低，因此地表径流系数相对较高 [27]。本研究采用的土壤为砂土，稳定入渗率较高 [28]；且园地为人工梯田，地形相对平缓；加上自然生草覆盖，更利于阻滞径流，减少地表径流，增加入渗形成渗漏 [29]。降水主要集中于 3 月至 11 月份，这一时期也是径流产生量最高的阶段。就施肥管理而言，催花保果肥和果实膨大肥也在这一阶段施用，季节性降水分布不均和橘园水肥供应不协调，容易造成肥料养分流失。过去，三峡库区有关研究多集中于地表径流与水、土和营养盐流失的产生与防治；本项研究表明，坡改梯加生草覆盖生态治理后，砂质土橘园降雨入渗形成的渗漏是降水产流的主要部分，形成的营养盐流失需要予以重视。

2016—2017 年研究期橘园大气沉降氮和磷总输入分别为  $38.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $0.4 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。对于水体而言，大气干湿沉降是面源污染的一个组成部分；而在橘园，干湿沉降形成氮磷输入是橘园系统氮磷营养盐输入的一部分。本项试验各处理小区（T1 对照除外）施肥氮输入和磷输入分别介于  $262.5\sim 1\,138 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $57.3\sim 248.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。平均施氮肥输入分别占总氮收入的 87.3%~96.8%；平均施磷肥输入分别占总磷输入的 99.3%~99.8%。因此，橘园绝大部分的氮磷收入来源于施肥，干湿沉降所占比例很低。

表 3 研究期脐橙园水分收支情况

Table 3 Water budget of the citrus orchard in the research period

日期 Date (yyyy-mm-dd)	降水量 Precipitation/mm	地表径流 Surface runoff/mm	蒸散发 Evapotranspiration/mm	渗漏 Seepage/mm
2016-01-01—2016-05-05	283.3	0	169.5	73.8
2016-05-06—2016-06-05	187.9	0	69.8	104.3
2016-06-06—2016-08-14	679.0	14.1	212.2	453.5
2016-08-15—2016-10-19	19.3	0	103.9	0
2016-10-20—2016-11-18	140.3	5.1	28.3	77.5
2016-11-19—2016-12-31	29.3	0	20.3	0
总量 Total	1 339	19.2	604.0	709.1
2017-01-01—2017-02-19	19.8	0	25.6	0
2017-02-20—2017-03-27	98.5	0	43.4	30.0
2017-03-28—2017-06-13	284.6	0	181.5	52.3
2017-06-14—2017-08-03	2.6	0	83.4	0
2017-08-04—2017-08-18	76.0	8.9	52.0	3.5
2017-08-19—2017-10-20	408.5	9.2	106.9	255.7
2017-10-21—2017-12-31	11.6	0	39.8	0
总量 Total	881.8	18.1	507.0	395.1

## 2.2 地表径流氮磷流失

2016—2017年观测期地表平均径流水总量和泥沙总量分别为  $165.9 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $47.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。径流量越大，产沙量越多。其中，T4 和 T6 径流量和泥沙量较多（表 4），T1、T2、T5 和 T7 径流量和泥沙量少。可见，施肥多少对地表径流和产沙无影响。已有观测显示，三峡库区坡耕地研究的产流量和产沙量分别为  $50 \sim 200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $10.8 \sim 29.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  [30]，本项试验用地已经采用坡改梯和生草覆盖管理模式，加上供试土壤为岩土构型的砂质结构 [31]，地表径流得到有效控制，土壤侵蚀降低，入渗增高，所以虽然坡度陡，但地表径流量和产沙量相对较低。自然雨养条件下，雨水是重要的水资源，控制地表径流不仅能减少水土流失，而且还能涵养水源，改善土壤水分供给。但是岩土构型的砂质土壤透水性好，持水能力低，当降水量高于土壤持水量的时候，会在岩土界面形成侧向渗漏，进一步慢渗汇入地表径流。

分析表明，地表径流全氮平均流失量为  $3.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ （图 2 a），其中 T5 全氮流失量最小，为  $2.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；T6 全氮流失量最大，为  $5.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。全磷平均流失量为  $0.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ （图 2 b），其中 T3 和 T7 全磷流失量较少，T4 全磷流失量最大，为  $1.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见，施肥量对地表径流氮磷流失量的影响不显著，这与橘园环沟施肥再覆土的施肥方式以及土壤入渗快和入渗率高有关。结果还表明，径流水和泥沙流失的全氮量分别占 68.7% 和 33.6%；全磷量分别占 65.2% 和 34.8%。可见，地表径流水体氮素和磷素流失比例较高，而已有研究的坡耕地地表径流养分主要通过泥沙态流失 [16]，泥沙携带氮素流失占 55.86% ~ 65.16%，磷素流失占 55% ~ 70% [32]。橘园实施坡改梯，且砂质土壤养分贫瘠，入渗快，地表生草覆盖，抗溅蚀；地面径流量少，冲刷力弱，土壤侵蚀低，因此氮磷流失以径流水体氮磷流失较多，而泥沙态流失偏少。

表 4 2016—2017 年研究期地表径流水量和泥沙量

Table 4 Surface runoff and sediment volume during the study period in 2016-2017

处理 Treatment	2016		2017	
	地表径流 Surface runoff / ( m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	泥沙量 Sediment volume / ( kg·hm <sup>-2</sup> )	地表径流 Surface runoff / ( m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	泥沙量 Sediment volume / ( kg·hm <sup>-2</sup> )
T1	106±92	22.5±10.3	144±52	22.1±4.0
T2	161±120	27.6±13.2	106±41	28.9±11.9
T3	224±6	64.1±34.7	148±93	27.1±16.0
T4	268±145	154.0±69.7	228±104	40.1±14.7
T5	57±49	21.9±16.8	46±25	25.2±12.2
T6	265±127	121.8±46.3	321±163	53.2±18.8
T7	109±75	29.5±13.4	140±78	21.1±14.4

注: T1 为不施肥对照处理小区。表中数据为平均值±误差。 Note: T1 was the control plot without fertilization. Data are means ± SD.

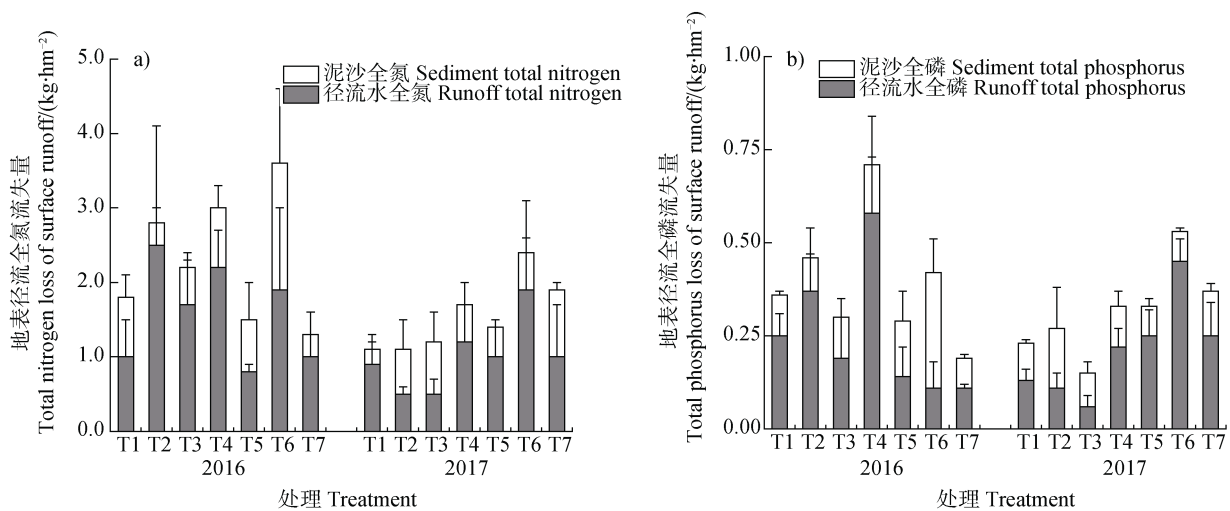


图 2 2016—2017 年研究期地表径流全氮 (a) 和全磷 (b) 流失量

Fig. 2 Total nitrogen loss (a) and total phosphorus loss (b) in surface runoff during the study period in 2016-2017

### 2.3 渗漏氮磷流失

2016—2017 年研究期渗漏全氮的平均流失量为 376.9 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中未施肥的 T1 小区全氮流失量最小, 为 172.9 kg·hm<sup>-2</sup>; 施肥量最大的 T7 小区全氮流失量最大, 为 603.9 kg·hm<sup>-2</sup> (表 5)。渗漏全氮的流失随着施肥量的增加而增多。渗漏全磷的平均流失量为 2.4 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中 T1 全磷流失量最小, 为 0.9 kg·hm<sup>-2</sup>; T5 全磷流失量最大, 为 3.5 kg·hm<sup>-2</sup> (表 6)。施肥较多小区的全磷流失量较多。施肥处理小区渗漏全氮和全磷的流失量远大于地表径流全氮和全磷的流失量 (图 3), 其中渗漏全氮和全磷平均流失量

分别占全氮和全磷总流失量的 99.0% 和 76.9%。去除未施肥处理小区的渗漏氮磷流失量, 渗漏导致的氮磷平均流失量分别占施肥量的 34.3% 和 5.1%, 最高为 38.0% 和 6.8%, 最低为 30.4% 和 2.6%。以接近推荐施肥量<sup>[10]</sup>的 T4 处理计算, 渗漏氮磷流失量占氮磷输入总量的 30.4% 和 6.4%。由此可见, 渗漏是砂质土梯田氮磷流失的主要途径。由于三峡库区水土流失严重, 地表径流造成养分的流失<sup>[30]</sup>一直为人们关注, 而对渗漏的研究重视不足。采用生态工程治理后的橘园, 水土流失得到有效控制, 由于水土流失造成的营养盐流失也大幅降低, 但是柑橘产区

表 5 2016—2017 年研究期渗漏全氮流失量

Table 5 Total nitrogen loss in interflow during the study period in 2016-2017 /((kg·hm<sup>-2</sup>))

日期 Date ( yyyy-mm-dd )	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	显著性 Sig
2016-01-01—2016-05-05	4.5±1.3a	8.3±0.3b	9.0±0.4bc	10.6±1.5c	12.9±0.8d	14.9±1.4de	16.0±1.3e	0.000
2016-05-06—2016-06-05	18.5±4.3a	23.0±0.9b	22.9±0.1b	22.8±0.4b	22.8±0.4b	23.3±0.2b	23.0±1.1b	0.053
2016-06-06—2016-08-14	91.7±5.3a	95.8±0.7ab	96.9±0.2b	97.6±0.1b	98.7±0.1b	99.1±0.3b	106.2±6.7c	0.004
2016-10-20—2016-11-18	27.1±12.9	35.1±0.5	35.8±2.0	32.7±3.6	35.0±0.2	35.6±0.5	33.7±2.4	ns
2017-02-20—2017-03-27	1.3±0.3a	2.1±0.3a	4.2±2.3ab	8.3±7.0ab	6.4±2.7ab	10.0±1.1 b	13.7±9.3b	0.042
2017-03-28—2017-06-13	7.5±3.0a	21.0±8.5ab	34.1±9.0b	40.2±3.3b	51.6±4.2bc	61.6±17.0cd	71.9±10.8d	0.000
2017-08-04—2017-08-18	0.4±0.0a	1.1±0.4ab	1.8±0.3bc	2.2±0.0c	2.6±0.1c	3.9±1.1d	5.6±0.2e	0.000
2017-08-19—2017-10-20	21.9±1.3a	83.4±16.8b	134.3±11.5c	144.5±38.8c	191.0±13.0d	224.0±14.9d	333.8±7.2e	0.000
合计 Total	172.9±28.1a	269.8±26.2b	339.0±10.5c	358.9±47.0d	421.0±16.4e	472.2±25.6f	603.9±38.5g	0.000

注：同行数据后不同字母代表处理间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )，ns 代表差异不显著。下同。Note: Data in the same row followed by different letters mean the significant difference between treatments at the  $P < 0.05$  levels, respectively. ns represents no significant difference. The same below.

表 6 2016—2017 年研究期渗漏全磷流失量

Table 6 Total phosphorus loss in interflow during the study period in 2016-2017 /((kg·hm<sup>-2</sup>))

日期 Date ( yyyy-mm-dd )	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	显著性 Sig
2016-01-01—2016-05-05	0.04±0.02	0.08±0.04	0.02±0.01	0.04±0.03	0.04±0.01	0.11±0.03	0.10±0.06	ns
2016-05-06—2016-06-05	0.03±0.01	0.03±0.02	0.07±13.0	0.08±0.03	0.13±0.10	0.05±0.01	0.16±0.06	ns
2016-06-06—2016-08-14	0.09±0.03	0.16±0.03	0.19±0.16	0.41±0.15	0.47±0.27	0.51±0.30	0.95±0.76	ns
2016-10-20—2016-11-18	0.05±0.03	0.17±0.19	0.34±0.23	0.43±0.12	0.09±0.04	0.15±0.06	0.13±0.07	ns
2017-02-20—2017-03-27	0.02±0.01	0.06±0.03	0.06±0.02	0.15±0.10	0.11±0.01	0.06±0.02	0.06±0.02	ns
2017-03-28—2017-06-13	0.06±0.03	0.05±0.02	0.07±0.04	0.10±0.08	0.06±0.04	0.09±0.07	0.07±0.03	ns
2017-08-04—2017-08-18	0.01±0.01	0.01±0.00	0.02±0.01	0.01±0.00	0.02±0.01	0.02±0.00	0.02±0.00	ns
2017-08-19—2017-10-20	0.62±0.4	1.20±0.43	0.69±0.36	1.56±0.96	2.53±1.02	1.77±1.62	1.81±0.34	ns
合计 Total	0.92±0.39	1.76±0.79	1.46±0.64	2.78±1.00	3.45±1.22	2.76±1.17	3.30±1.31	ns

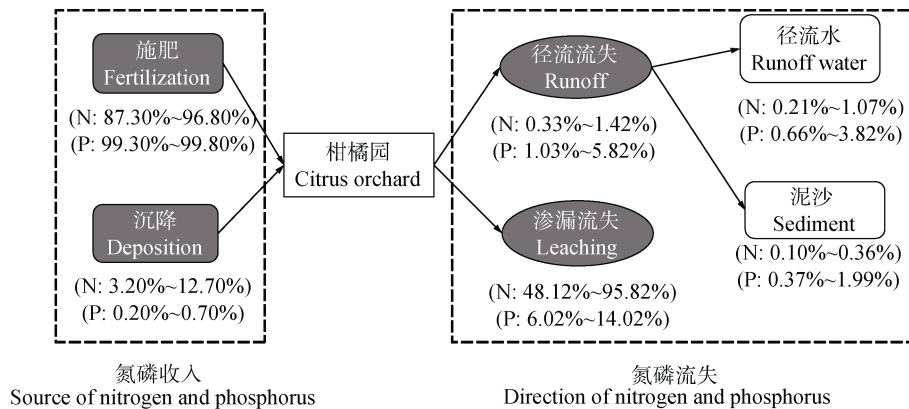


图 3 2016—2017 年研究期橘园施肥与沉降氮磷输入比例和氮磷流失占输入的比例

Fig. 3 The proportion of nitrogen and phosphorus income and the proportion of nitrogen and phosphorus loss in the income of citrus orchard were studied in 2016-2017



氮磷面源污染问题依然困扰着人们。本项研究表明,生态治理后的砂质土壤柑橘园,虽然地表径流引起的氮磷流失很低,入渗形成渗漏引起的氮磷流失是值得人们重视的环境问题。因此,进一步优化柑橘园水肥管理,阻控渗漏氮磷流失,提高肥料利用率,从而增产增效,是今后必须面临和解决的现实问题。

## 2.4 施肥量与渗漏氮磷流失关系

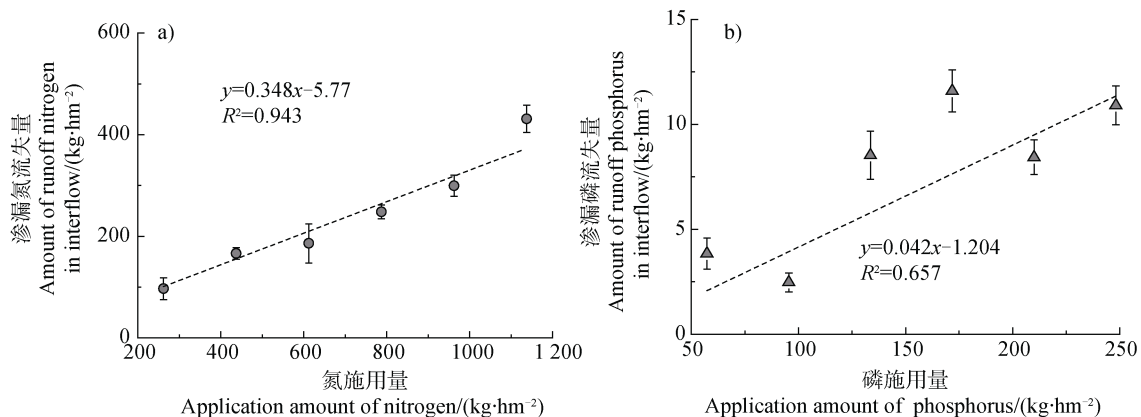
试验表明,对照在连续 2 年不施肥条件下,渗漏氮磷流失量分别为  $172.9 \pm 28.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.92 \pm 0.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可见,试验前土壤中具有一定量速效态氮磷的残存。将各个施肥处理渗漏氮磷的流失量分别扣除 T1 对照小区渗漏氮磷的流失量,以反映不同施肥量处理对氮磷流失的影响,表示为施肥引起的氮磷流失增量。结果发现,各处理渗漏氮流失增量与施肥量有显著的线性相关关系 ( $P < 0.01$ ) (图 4 a),拟合公式为  $y = 0.35x - 5.77$  ( $y$  为氮流失增加量,  $x$  为施肥量)。说明随着氮肥施用量的增加,渗漏氮素淋失增量呈线性增高。但是,磷流失量与施肥量无显著的相关关系 ( $P = 0.05$ ) (图 4 b)。主要由于氮素进入土壤后经过硝化过程后,多呈硝态氮形态,硝态氮容易在土壤中迁移<sup>[33]</sup>而通过渗漏淋失;而肥料释放的磷素在被根系利用的同时,残余的磷素被耕层土壤吸附固定,仅有少量能够下渗淋失至土壤底层<sup>[34]</sup>。所以,不同施肥处理间肥料磷输入量具有较大的差异,但是渗漏的流失量均较低。其次,定植柑橘树前在离地面 50 cm 的地下施用一层富含

磷素的鸡粪 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为  $34.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),并将表土深埋。鸡粪经过矿化分解后,氮素多淋失,而磷素被土壤矿质颗粒吸附而缓慢释放;加上深埋表层土壤形成的磷释放,因而对不同施肥水平引起的磷素流失效应造成影响。

由上可见,自然降雨条件下,岩土构型砂质土梯田成年橘园采用留草覆盖的管理模式,降雨除消耗于蒸散发外,主要通过渗漏流失;采用环沟施肥,渗漏形成的氮磷养分流失是氮磷流失的主要途径,且施肥量越高氮素淋失量呈线性增高;不同施肥量对地表径流氮磷流失无显著影响。由于柑橘养分需求大,而退化山地土壤养分贫瘠,施肥仍为必要措施,且容易造成过量施肥,土壤肥料残存量高。试验表明,在不施肥情况下,氮素渗漏损失平均达  $86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。此外,现有常规管理年度一般分 2~3 次施肥,但在自然降雨条件下,土壤水肥难以协调供应,肥料养分利用率低,且不利于增产增收。因此,柑橘园实施配方施肥,改善肥料运筹的同时,需要进一步优化水肥调控,促进养分高效利用。

## 3 结 论

通过对橘园小区两年的野外试验发现,自然雨养的砂土梯田橘园在生草覆盖生态保护模式下,地表径流和土壤侵蚀已得到有效控制,养分的主要流失途径为渗漏。研究期降水随渗漏流失量平均占降



注:图中渗漏氮磷流失量是 2016—2017 年各施肥处理渗漏氮磷流失总量扣除对照组氮磷流失总量的值。Note: The amount of leakage nitrogen and phosphorus loss in the figure is the total amount of leakage nitrogen and phosphorus loss of each fertilization treatment deducting the total amount of nitrogen and phosphorus loss of the control group from 2016 to 2017.

图 4 2016—2017 年研究期橘园氮磷施肥量与渗漏氮磷流失量的关系

Fig. 4 The relationship between the NP fertilization and the NP losses in citrus orchards in 2016-2017

水量的 48.9%，地表径流仅占降水量的 1.73%。橘园氮磷流失量占施肥量的比例分别为 34.5% 和 6.4%，其中通过渗漏流失，平均分别占施肥量的 34.3% 和 5.1%，氮磷通过地表径流流失量较小。渗漏氮流失量随着施肥量的增多而增大，二者呈显著的线性正相关。因此，砂质土梯田橘园渗漏养分流失，尤其是氮渗漏问题应当引起重视。经过水土流失生态治理后，砂质土壤橘园施肥管理必须注意水肥协调，在实施配方施肥的基础上，改善肥料运筹，根据橘园年营养生理需求，实行水肥同步供应，避免过量养分残存与强降雨相遇造成养分的渗漏损失，从而实现养分高效利用和增产增效，且进一步降低环境负荷。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Chun C P, Peng L Z, Jiang C L, et al. Preliminary study on soil nutrient status of some citrus orchards in Three Gorges Reservoir District[J]. *South China Fruits*, 2009, 38 ( 2 ): 1—6. [淳长品, 彭良志, 江才伦, 等. 三峡库区部分柑橘园土壤营养状况的初步研究[J]. *中国南方果树*, 2009, 38 ( 2 ): 1—6.]
- [ 2 ] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of ecological and environmental monitoring of the Three Gorges Project in 1999[R/OL]. 1999. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zjsxgcstyhjcbg/>. [中华人民共和国生态环境部. 1999 年长江三峡工程生态与环境监测公报 [R/OL]. 1999. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zjsxgcstyhjcbg/>.]
- [ 3 ] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of ecological and environmental monitoring of the Three Gorges Project in 2018[R/OL]. 2018. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zjsxgcstyhjcbg/>. [中华人民共和国生态环境部. 2018 年长江三峡工程生态与环境监测公报 [R/OL]. 2018. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zjsxgcstyhjcbg/>.]
- [ 4 ] Luan J H, Xiang X J, Liu D, et al. Analysis of characteristics of soil beneficial elements in different supergene environment of Fengjie navel orange production area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39 ( 36 ): 22623—22624, 22636. [栾进华, 向晓军, 刘东, 等. 奉节脐橙产区不同表生环境土壤有益元素特征分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39 ( 36 ): 22623—22624, 22636.]
- [ 5 ] Müller B, Berg M, Yao Z P, et al. How polluted is the Yangtze River? Water quality downstream from the Three Gorges Dam[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 402 ( 2/3 ): 232—247.
- [ 6 ] Lu X X, Higgitt D L. Estimating erosion rates on sloping agricultural land in the Yangtze Three Gorges, China, from caesium-137 measurements[J]. *Catena*, 2000, 39 ( 1 ): 33—51.
- [ 7 ] Li S W. Study on the nutrition status and variable rate fertilizer practice to the hill orchards in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. [李松伟. 三峡库区丘陵柑橘园土壤营养状况与变量施肥技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.]
- [ 8 ] Wang T, Huang Z L, Zeng L X, et al. Effects of fertilization on the nitrogen residual amounts and leaching from citrus orchard soil in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40( 3 ): 1468—1474. [王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40 ( 3 ): 1468—1474.]
- [ 9 ] Dai W C, Zhou X B, Huang X C. Current status investigation and evaluation on citrus fertilization in Fengjie County of Chongqing[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42 ( 8 ): 175—178. [代文才, 周鑫斌, 黄兴成. 重庆市奉节县柑橘施肥现状调查与评价[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42 ( 8 ): 175—178.]
- [ 10 ] Liang S S. Studies on NPK fertilization status and the potential of reducing application rate in major citrus planting regions of China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. [梁珊珊. 我国柑橘主产区氮磷钾肥施用现状及减施潜力研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.]
- [ 11 ] Wang L, Tang L L, Wang X, et al. Effects of alley crop planting on soil and nutrient losses in the citrus orchards of the Three Gorges Region[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 110 ( 2 ): 243—250.
- [ 12 ] Xu X, Tan Y, Yang G. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124: 115—125.
- [ 13 ] Dai Z M, Liu G F, Chen H H, et al. Long-term nutrient inputs shift soil microbial functional profiles of phosphorus cycling in diverse agroecosystems[J]. *The ISME Journal*, 2020, 14 ( 3 ): 757—770.
- [ 14 ] Xia L Z, Hoermann G, Ma L, et al. Reducing nitrogen and phosphorus losses from arable slope land with contour hedgerows and perennial alfalfa mulching in Three Gorges Area, China[J]. *Catena*, 2013, 110: 86—94.
- [ 15 ] Zheng H J, Zuo J C, Xi T H, et al. Nitrogen output through runoff on red soil slope and its composition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 ( 5 ): 1168—1178. [郑海金, 左继超, 奚同行, 等. 红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成[J]. *土壤学报*, 2018, 55 ( 5 ): 1168—1178.]
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Lv Y J, Peng X H, Gao L, et al. Characteristics of

- nitrogen and phosphorus losses through surface runoff on sloping land, red soil hilly region[J]. *Soils*, 2015, 47(2): 297—304. [吕玉娟, 彭新华, 高磊, 等. 红壤丘陵岗地区坡地地表径流氮磷流失特征研究[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 297—304.]
- [ 18 ] Wu Y, Miao F, Li L, et al. Time-varying reliability analysis of Huangtupo Riverside No.2 Landslide in the Three Gorges Reservoir based on water-soil coupling[J]. *Engineering Geology*, 2017, 226: 267—276.
- [ 19 ] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin on ecological and environmental monitoring of the Three Gorges Project of the Yangtze River in 2017[R/OL]. Beijing: 2017. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zjxgcsstyhjcbg/>. [中华人民共和国生态环境部. 2017 年长江三峡工程生态与环境监测公报[R/OL]. 北京: 2017. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zjxgcsstyhjcbg/>.]
- [ 20 ] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETO by the FAO56 Penman-Monteith method[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 1—22.
- [ 21 ] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO irrigation and drainage paper No. 56. United Nations - FAO, Rome: 1999.
- [ 22 ] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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.]
- [ 23 ] MEP. Water quality-determination of total nitrogen-alkaline potassium persulfate digestion-UV spectrophotometric method: GB 11894-1989[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 1989. [中国环境保护局. 水质-总氮的测定-碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: GB 11894-1989[S]. 北京: 中国环境保护局, 1989.]
- [ 24 ] MEP. Water quality-determination of total phosphorus - ammonium molybdate spectrophotometric method: GB 11893-1989[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 1989. [中国环境保护局. 水质-总磷的测定-钼酸铵分光光度法: GB 11893-1989[S]. 北京: 中国环境保护局, 1989.]
- [ 25 ] Bremner J M, Tabatabai M A. Use of an ammonia electrode for determination of ammonium in Kjeldahl analysis of soils[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1972, 3(2): 159—165.
- [ 26 ] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1962, 27(1): 31—36.
- [ 27 ] Liu L, Liu H B, Wang T, et al. Phosphorus loss from sloping cropland in water fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11): 2609—2618. [刘莲, 刘红兵, 汪涛, 等. 三峡库区消落带农用坡地磷素径流流失特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2609—2618.]
- [ 28 ] Li J. Study on the influence of terrace measures on water and sediment changes in jinghe river basin[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2015. [李娟. 梯田措施对泾河流域水沙变化的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [ 29 ] Liu B B. Effects of fertilization and vegetation cover on nutrient loss of dry sloping land in the Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [刘彬彬. 施肥及植被覆盖对三峡库区旱坡地养分流失的影响研究[D], 重庆: 西南大学, 2016.]
- [ 30 ] Xie X D, Ni J P, Zhou C. Effects of configuration mode of crop-mulberry system in slope cropland on runoff interception and loss of nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2015, 29(5): 66—69, 94. [谢雪东, 倪九派, 周川. 三峡库区坡耕地农桑系统对径流拦截和氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 66—69, 94.]
- [ 31 ] Xia L Z, Han Q Z, Ma L, et al. Tree dendrometric parameters modifying method to evaluate the effects of fertilization levels on citrus yields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1097—1104. [夏立忠, 韩庆忠, 马力, 等. 柑桔测树学参数矫正法比较不同施肥水平对产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*. 2018, 24(4): 1097—1104.]
- [ 32 ] Xia L Z, Liu G H, Ma L, et al. The effects of contour hedges and reduced tillage with ridge furrow cultivation on nitrogen and phosphorus losses from sloping arable land[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(3): 462—470.
- [ 33 ] Wang T, Huang Z L, Zeng L X, et al. Assessment on the comprehensive control of soil erosion and soil nutrient losses in the reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir Area - A case study of lanlingxi watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 83—88. [王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区退耕还林土壤侵蚀及养分流失控制—以兰陵溪小流域为例[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 83—88.]
- [ 34 ] Wang J W, Wang Y L, Yao Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1240—1250. [王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1240—1250.]

(责任编辑: 陈荣府)