

DOI: 10.5846/stxb202101140149

杨任翔, 邱凡, 郑佳舜, 赵子贵, 罗 骆, 李桂芳. 赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征. 生态学报, 2022, 42(3): 904-913.

Yang R X, Qiu F, Zheng J S, Zhao Z G, Luo L, Li G F. Characteristics of runoff and the dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 904-913.

赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征

杨任翔, 邱 凡, 郑佳舜, 赵子贵, 罗 骆, 李桂芳*

广西大学农学院, 南宁 530004

摘要:为探究南方高强度、高频次降雨下赤红壤区坡耕地土壤侵蚀及氮磷养分流失的特征,基于野外径流小区原位观测试验,通过测定自然降雨下赤红壤植蔗坡地坡面径流和溶解态氮磷流失量,探讨自然降雨下甘蔗种植对赤红壤坡面径流及溶解态氮磷流失的影响。结果表明:(1)2019年和2020年,径流量分别为1111.3 m³/hm²和3269.4 m³/hm²,硝态氮(NO₃⁻-N)流失量分别为1.39 kg/hm²和15.60 kg/hm²,铵态氮(NH₄⁺-N)流失量分别为0.37 kg/hm²和1.02 kg/hm²,可溶性磷流失量分别为0.20 kg/hm²和0.27 kg/hm²。2019年和2020年植蔗坡地径流及溶解态氮磷流失量均集中在6月份,占流失总量的45%以上,硝态氮(NO₃⁻-N)是径流氮素流失的主要形式,占79%以上。此外,2019年和2020年5月至8月,侵蚀性降雨场次分别为18次和23次,侵蚀性降雨量分别为407.8 mm和668.0 mm。(2)不同侵蚀性降雨条件下,植蔗坡地溶解态氮磷流失量及其浓度波动较大,甘蔗生长前期(5—6月)溶解态氮磷流失量及其浓度呈上升趋势,而生长后期(7—8月)则呈波动下降趋势。2019年和2020年观测期侵蚀性降雨的年内分布存在明显差异,均集中在6月份,占35%以上。(3)坡面径流量与降雨量和最大30 min降雨强度呈极显著的正相关关系,同时坡面径流量与径流中硝态氮、铵态氮及可溶性磷流失量均呈极显著正相关关系。研究结果有助于明晰南方赤红壤区蔗区坡面土壤侵蚀及养分流失特征。

关键词:甘蔗种植;自然降雨;赤红壤;地表径流;氮磷流失

Characteristics of runoff and the dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil

YANG Renxiang, QIU Fan, ZHENG Jiashun, ZHAO Zigui, LUO Luo, LI Guifang*

College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: The characteristics of soil loss and nutrient loss in sloping land are quite different among different areas of China, and crop patterns also have significant impacts on these indicators. The objectives of this study were as follows: 1) to explore the characteristics of soil erosion and nutrient loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil; and 2) to analyze the impacts of sugarcane growing stage and natural rainfall characteristics on soil erosion and nitrogen and phosphorus loss characteristics. This research based on the in-situ observation test of runoff plot and measured the loss of runoff, dissolved nitrogen, and phosphorus in sloping land with planting sugarcane. The amounts and concentrations of nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), and dissolved phosphorus (DP) under individual natural rainfall during May to August in 2019 and 2020 were observed. The results showed that: (1) in 2019 and 2020, the runoffs, nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), ammonium nitrogen (NH₄⁺-N), and dissolved phosphorus (DP) loss were 1111.3 m³/hm² and 3269.4 m³/hm², 1.39 kg/hm² and 15.60 kg/hm², 0.37 kg/hm² and 1.02 kg/hm², 0.20 kg/hm² and 0.27 kg/hm², respectively. The runoff and its dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane under 2019

基金项目:国家自然科学基金项目(41967010);广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA138024);广西科技基地和人才专项(桂科 AD17195060)

收稿日期:2021-01-14; **网络出版日期:**2021-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lifangdyx@163.com

and 2020 were both concentrated in June, which accounted for more than 45%, and NO_3^- -N was the main form of nitrogen loss in runoff, which accounted for more than 79% of total nitrogen loss. Besides, the times of individual erosive rainfall were 18 and 23, and the erosive rainfall amounts were 407.8 and 668.0 mm from May to August in 2019 and 2020, respectively. (2) The amounts of dissolved nitrogen and phosphorus loss and their concentrations in sloping land with planting sugarcane showed great fluctuation under different erosive rainfalls and stages of sugarcane growth. There were obvious differences in the annual distribution of erosive rainfall between observation period of 2019 and 2020, which were both concentrated in June, which accounted for more than 35% of total rainfall. In the early stage of sugarcane growth (from May to June), the losses of dissolved nitrogen and phosphorus and their concentrations showed an upward trend, while in the late stage of sugarcane growth (from July to August), they showed a fluctuating downward trend. (3) There was a significantly positive correlation between runoff and rainfall and maximum 30 min rainfall intensity, meanwhile, there was a significantly positive correlation between runoff and the loss of nitrate nitrogen (NO_3^- -N), ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), and dissolved phosphorus (DP). The results can provide a theoretical basis for clarifying the soil erosion characteristics of sloping land with planting sugarcane in the lateritic soil region of southern China.

Key Words: sugarcane planting; natural rainfall; lateritic soil; surface runoff; nitrogen and phosphorus loss

坡耕地土壤侵蚀导致农田氮磷养分随之流失,造成土地退化和农业面源污染,已成为世界性的环境问题之一^[1]。由于南方红壤分布区独特的自然地理环境和高强度降雨,使得我国南方红壤区的水土流失与氮磷养分流失问题日益严重^[2]。坡面水土流失受降雨特征、作物类型和土壤类型等多种因素共同影响^[3],其中,降雨是引起地表径流的动力来源^[4],高降雨量极易引发地表径流^[5],而径流是坡耕地氮磷养分流失的动力和重要载体^[6-7],因此,径流量的大小影响坡面氮磷养分的流失量^[8]。不同降雨条件下坡耕地氮磷流失特征明显不同,其中,高强度降雨是导致坡耕地养分流失的主要原因^[9],坡面氮磷流失量与降雨量及雨强呈显著正相关^[10-11]。次降雨下径流中氮磷浓度在不同降雨条件具有较大的波动性^[5],但是,地表径流中氮磷养分浓度与各降雨参数均没有显著相关关系^[12]。

作物种植是影响坡耕地地表径流及氮磷流失的重要因素^[5]。其中,作物类型、作物生育期、作物种植方式等对坡耕地地表径流及养分流失具有重要影响^[13-14]。不同类型作物由于根系及作物植株特征不同,导致坡耕地土壤抗侵蚀能力及降雨再分配存在明显不同,进而影响坡面侵蚀^[15]。研究表明,当作物地表覆盖度接近时,坡面径流量与氮磷流失量均表现出红薯>花生^[16],而花生坡耕地土壤侵蚀量和氮素流失量均低于玉米坡耕地^[17],可溶性磷流失总量则表现为谷子>玉米>大豆^[14]。作物不同生育期主要通过影响坡面地表覆盖度及作物生长状况进而影响坡面径流及氮磷流失特征^[18]。模拟降雨条件下,玉米生长初期是坡面径流及养分流失的主要时期^[19],而玉米成熟期坡面径流及氮素流失减少^[20]。花生地水土流失及养分流失随花生生长天数的增加而有不同程度减少^[21]。

甘蔗是我国最重要的糖料作物,2019年全国甘蔗种植面积为139.1万 hm^2 ,在中国广西、云南、广东等省份均有不同面积的种植,其中广西是我国最大的甘蔗种植区,占全国甘蔗种植总面积的64.0%^[22]。全球范围内,甘蔗主要种植在坡度低于 5° 的坡地,但由于耕地面积减少以及对甘蔗产量需求的提高,甘蔗种植地已扩展到较陡峭的斜坡上(坡度 $\geq 30^\circ$),使蔗地更容易受到流水侵蚀^[23]。然而,现有关于植蔗坡地坡面侵蚀特征的研究主要以年际尺度下的定性研究为主,次降雨下植蔗坡地地表径流及其养分流失特征目前尚不明晰。同时,与其他作物相比,甘蔗生长周期长(2—12月),其快速生长期为6—9月,与种植区雨季同步^[24],在此条件下,甘蔗不同生育期对坡面径流及氮磷养分流失特征的研究相对较薄弱。基于此,本文以广西赤红壤植蔗坡地为研究对象,基于径流小区原位观测试验,研究甘蔗种植下坡地的径流及氮磷养分流失特点和规律,探讨自然降雨下甘蔗种植对赤红壤坡耕地坡面径流及溶解态氮磷养分流失特征影响,研究结果可为明晰区域植蔗坡耕地水土流失及养分流失防治提供理论依据。

1 材料与方

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区南宁市,试验地点位于广西大学校内农科试验基地(108°17'38"E, 22°50'59"N)(图1)。研究区属亚热带季风气候区,年平均降雨量1304 mm,且降雨集中于5—9月,达全年降雨量的70%左右,年均气温22℃,年均相对湿度为79%。供试土壤类型为赤红壤,土壤母质为第四纪红黏土,土壤容重为1.2—1.3 g/cm³,其它基本理化性质见表1。

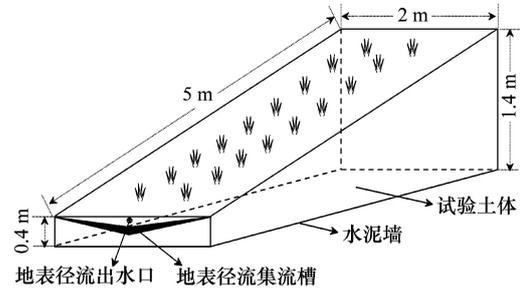


图1 试验小区示意图

Fig.1 Schematic diagram of test area

表1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Chemical and physical properties of experimental soil

年份 Year	全氮 TN/ (g/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (mg/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (mg/kg)	全磷 TP/ (g/kg)	有机质 OM/ (g/kg)	pH
2019	1.24	24.74	13.13	0.64	6.58	6.74
2020	2.26	60.04	12.35	1.49	6.98	6.97

TN: 全氮 Total nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate nitrogen; NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; OM: 有机质 Organic matter

1.2 试验方法

试验采取径流小区野外原位观测法,甘蔗为新植蔗,观测时间为2019年和2020年5—8月(主要包括甘蔗萌芽期、苗期、分蘖期和伸长期)。径流小区坡长5 m,宽度2 m,坡向朝南,基于广西野外植蔗坡地的调查,植蔗坡地坡度一般在15°以下,参考其他研究区的试验设计^[5,17],本研究中植蔗坡地径流小区坡度设为10°。径流小区底部修建出水口,出水口处安置矩形集流槽,用于收集自然降雨下坡面径流泥沙样。具体试验处理见表2,除草等其他田间管理措施均按当地农耕习惯进行。

表2 试验处理

Table 2 Experimental treatment

年份 Year	作物及品种 Crops and varieties	种植日期 Planting date	种植方式 Planting method	施肥 Fertilization
2019	甘蔗 桂柳 05136 号	5 月 8 日	顺坡种植,双芽段单行双株 2 列	氮肥(N) 360 kg/hm ² , 磷肥(P ₂ O ₅) 90 kg/hm ² , 钾肥(K ₂ O) 75 kg/hm ² ; 氮肥与钾肥按基肥 30% + 追肥 70% 施用, 磷肥全部作基肥施用
2020	甘蔗 桂糖 42 号	4 月 8 日		

1.3 样品采集与分析

每次自然降雨结束后,测定径流小区下部矩形集流槽内水深,将集流槽内径流与泥沙充分搅匀后,用500 mL聚乙烯塑料瓶采集径流样,每个径流小区采集3瓶,随后立即置于4℃冰箱保存,并在48 h测定完毕。每次取样后及时将集流槽清洗干净,且用彩钢瓦封盖严实。降雨过程资料通过试验区附近气象站的翻斗式自记雨量器(雨后12 h内采集)获得。

径流量用体积法测定,测定径流中可溶性磷(DP)、硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)等指标。可溶性磷(DP)使用过滤液(原液经0.45 μm滤膜过滤)经K₂S₂O₈处理,然后用紫外分光光度计(型号:UV2600,产地:日本)测定^[5];硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)均使用过滤液经连续流动化学分析仪(型号:AA3,产地:德国)进行测定^[5]。

1.4 数据分析方法

利用 SPSS 19.0 进行数据的相关性与显著性分析; 利用 Origin 2018 和 Excel 2013 进行图表绘制。

2 结果分析

2.1 植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征

不同时期植蔗坡地坡面径流量及溶解态氮磷流失量存在明显不同(表 3)。2019 年, 坡面径流总量为 $1111.3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 其中 6 月径流量最大, 占比 50.0%, 其次是 5 月(23.7%) 和 7 月(20.0%), 8 月最低(6.3%)。5—8 月硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失总量分别为 $1.39 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $0.37 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $0.20 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 且在各月内的分布存在明显差异。2019 年 6 月的硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失量均显著高于其他月份, 分别占 5—8 月各养分流失总量的 69.1%、58.4% 和 56.6%。此外, 8 月的硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失量均为最低, 仅占 5—8 月流失总量的 4.7%、4.8% 和 4.1%。2020 年 5—8 月坡面径流总量、硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失总量分别为 $3269.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 $15.60 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $1.02 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $0.27 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。6 月的径流量、硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失量仍均显著高于其他月份, 分别占 5—8 月流失总量的 45.7%、73.4%、62.1% 和 66.9%; 其次是 8 月, 分别占比 35.6%、12.3%、26.3% 和 17.7%。

表 3 赤红壤植蔗坡地径流及溶解态氮磷流失量

Table 3 Runoff, dissolved nitrogen and phosphorus loss in sloping land with planting sugarcane of lateritic soil

年份 Year	月份 Month	径流量 Runoff/ (m^3/hm^2)	硝态氮 $\text{NO}_3^-/\text{N}/$ (g/hm^2)	铵态氮 $\text{NH}_4^+/\text{N}/$ (g/hm^2)	可溶性磷 DP/ (g/hm^2)
2019	5	263.6±5.4ab	283.4±174.6b	62.9±2.6b	51.1±17.8b
	6	556.1±151.5a	957.6±265.9a	215.5±55.8a	111.6±7.7a
	7	221.3±78.9ab	79.3±59.1b	73.0±14.0b	19.3±7.2b
	8	70.3±43.3b	64.8±15.3b	17.9±11.4b	15.2±10.1b
2020	5	394.3±1.9c	897.1±270.5b	94.0±12.1c	20.4±2.5b
	6	1494.2±39.4a	11442.6±1094.2a	635.3±41.4a	181.7±26.2a
	7	218.1±11.5d	1332.2±335.0b	24.8±0.9c	21.3±3.2b
	8	1162.9±13.7b	1924.3±135.0b	269.3±5.2b	48.1±5.7b

表中数据为平均值±标准误差; 同列不同字母表示各处理在 5% 水平上差异显著; DP: 可溶性磷 Dissolved phosphorus

通过对研究区 2019 年和 2020 年 5—8 月的降雨特征分析可知(图 2), 2019 年 5—8 月降雨总量为 625.0 mm, 主要集中在 6 月和 7 月(162.4、187.8 mm)。2020 年 5—8 月降雨总量为 869.0 mm, 其中, 6 月降雨量最多(283.0 mm), 其次为 8 月(238.8 mm)。降雨在年内的分布不同, 是导致坡面径流及溶解态氮磷流失特征在年内分布存在较大差异的原因之一。

与 2019 年相比, 2020 年坡面径流、硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失总量分别增加了 194.2%、1026.0%、177.1% 和 37.7%, 其中, 硝态氮流失量的增加最为明显, 2020 年各月硝态氮流失量是 2019 年的 3—30 倍不等, 表明植蔗坡地坡面径流及养分流失, 尤其是硝态氮养分流失, 存在较大的年际差异。2019 年和 2020 年硝态氮流失量占溶解态氮流失量的 79.0% 和 93.8%, 除 2019 年 7 月, 2019 年和 2020 年各月硝态氮流失量在溶解态氮流失占比均超过 78%, 表明研究区溶解态氮素流失以硝态氮为主。同时结果还表明, 2019 与 2020 年 6 月坡面径流、硝态氮、铵态氮、磷流失量均显著高于其他月份, 因此, 在赤红壤地区甘蔗生产中, 需特别注意在此期间径流养分流失问题。

2.2 次降雨条件下植蔗坡地径流及溶解态氮磷养分流失特征

2.2.1 径流量特征

为进一步探讨植蔗坡地坡面径流流失特征, 对 2019—2020 年侵蚀性降雨下坡面径流及氮磷养分流失量展开深入分析。2019 年和 2020 年 5—8 月共发生侵蚀性降雨 41 场, 其中 2019 年 18 场(3.0—56.4 mm), 2020

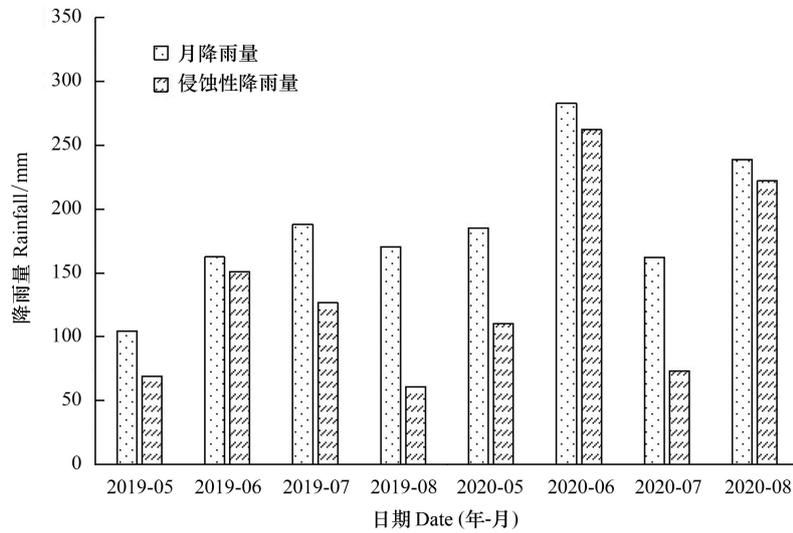


图2 2019年和2020年研究区5—8月降雨特征

Fig.2 Rainfall characteristics of the study area from May to August in 2019 and 2020

年 23 场(4.2—74.8 mm),总侵蚀性降雨量分别为 407.8 mm 和 668.0 mm。2019 年侵蚀性降雨主要集中在 6 月和 7 月(151.2 mm 和 126.6 mm),2020 年则集中在 6 月和 8 月(262.2 mm 和 222.0 mm)(图 2)。由图 3 可知,次降雨下,2019—2020 年坡面径流量均随降雨量的变化呈现出较大的波动性。2019 年次降雨下植蔗坡地坡面径流量在 1.0—260.8 m³/hm²之间,整体上随次降雨年内分布表现为增加-减少-增加-减少的变化趋势,且与次降雨量的变化趋势基本一致。对 2020 年而言,次降雨下植蔗坡地坡面径流量介于 3.7—493.8 m³/hm²,整体上表现为 6—7 月波动下降,7—8 月表现为波动增加,随次降雨量的增加而明显增加。

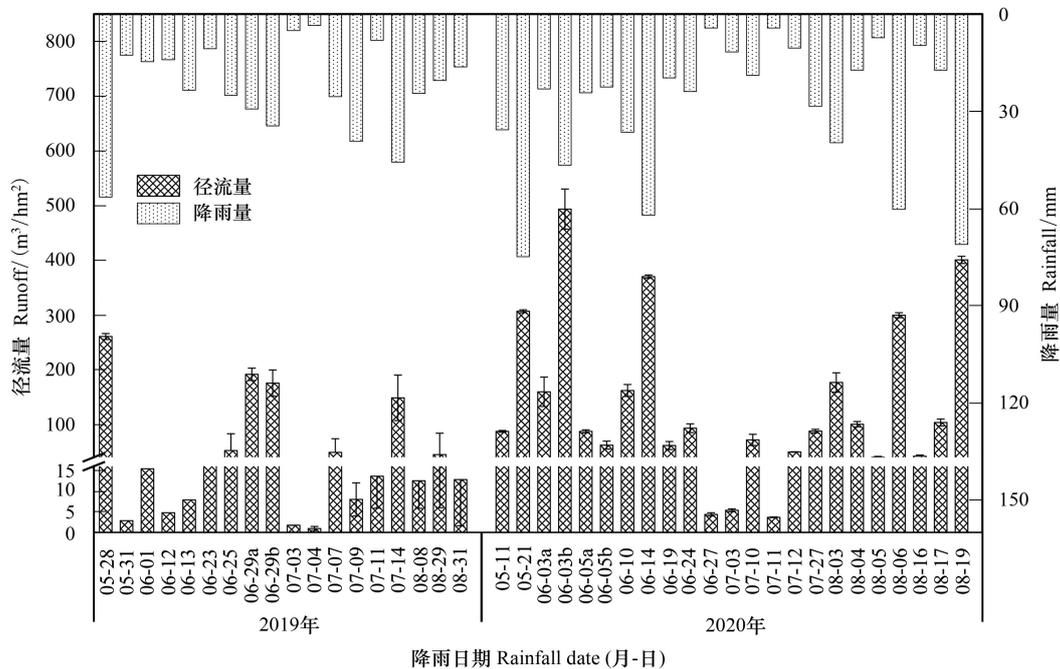


图3 次降雨条件下坡面径流特征

Fig.3 Slope runoff characteristics under different rainfall conditions

图中 a 和 b 表示同一日期内第一场和第二场降雨,下同

2.2.2 溶解态氮磷流失特征

图 4 为研究区硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失特征,由图 4 可知,2019 年次降雨条件下植蔗坡地坡面径流硝态氮流失量介于 1.0—492.2 g/hm²,在年内表现为先升后降的变化趋势,在 7 月以后,硝态氮流失量较低 (<40 g/hm²)且变化平稳(图 4)。次降雨下,硝态氮浓度变化同样具有明显的波动性,表现出 5—7 月稳定上升,7—8 月波动下降的趋势,最高为 7.44 mg/L(7 月 4 日),最低仅为 0.07 mg/L(7 月 11 日)。2020 年次降雨条件下硝态氮流失量在 32.5—3129.7 g/hm²,最大流失量发生在 6 月 3 日,在此之前,硝态氮流失量表现为稳定增加的趋势,在此之后,表现为波动下降趋势。2020 年次降雨下径流硝态氮浓度呈现较大差异,6 月和 7 月径流硝态氮浓度较高,介于 5.8—11.5 mg/L,而 5 月和 8 月硝态氮浓度较低,介于 0.4—4.1 mg/L。

2019 年径流中铵态氮流失量在 0.3—83.6 g/hm²之间(图 4),变化较大,其中流失量大于 50 g/hm²的降雨有 3 次,都集中在 5 月和 6 月,6 月以后次降雨下铵态氮流失量均低于 30 g/hm²。2019 年坡面径流中铵态氮浓度变化较小(0.2—1.44 mg/L),5—7 月铵态氮浓度总体上呈波动上升趋势,在此之后则有明显的降低趋势。2020 年次降雨条件下铵态氮流失量在 6.8—302.2 g/hm²之间,其中 3 场降雨铵态氮流失量超过 100 g/hm²,6 月 2 场,8 月 1 场,其余次降雨下铵态氮流失量均低于 20 g/hm²。且 2020 年径流中铵态氮浓度总体上差别不大,除 5 月 11 日和 6 月 14 日较高以外(浓度分别为 0.7 mg/L 和 0.8 mg/L),其余时间铵态氮浓度均在 0.1—0.5 mg/L 之间,且 7—8 月铵态氮浓度明显低于 5—6 月。

2019 年次降雨下植蔗坡地坡面径流中可溶性磷流失量在 0.1—59.5 g/hm²之间(图 4),除 5 月 28 日和 6 月 29 日 3 场降雨可溶性磷流失量大于 20 g/hm²以外,其余降雨下可溶性磷流失量均低于 10 g/hm²。2019 年可溶性磷浓度波动性较大(0.04—0.41 mg/L)。2020 年次降雨条件下可溶性磷流失量在 0.6—121.4 g/hm²之间,峰值出现在 6 月 14 日,除此以外,次降雨下可溶性磷流失量整体差别不大,均低于 25 g/hm²。2020 年径流中可溶性磷浓度在 0.01—0.33 mg/L 之间,且整体上差异较小。综上可知,次降雨下,2019 与 2020 年硝态氮、铵态氮、可溶性磷流失量总体上随次降雨呈波动变化,且均在 6 月出现明显的峰值。对于硝态氮、铵态氮、可溶性磷流失浓度,则没有明显的规律性,且波动性较大。

2.3 赤红壤植蔗坡面径流及溶解态氮磷流失量与降雨特征参数相关分析

为进一步分析蔗地坡面径流及溶解态氮磷流失的影响因素,对 37 场降雨下植蔗坡地径流流失与降雨特征参数进行了相关分析(表 4)。由表 4 可知,植蔗坡地径流量与降雨量和最大 30 min 降雨强度(I_{30})表现为极显著正相关关系,而与降雨历时和平均雨强(I)无显著关系,表明高强度、大雨量降雨是造成蔗地坡面径流的主要原因;硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失量与径流量、降雨量和最大 30 min 降雨强度(I_{30})总体均表现为极显著正相关关系,与降雨历时和平均雨强(I)总体上呈不显著相关关系,表明植蔗坡地溶解态氮磷流失量主要受坡面径流量及高强度降雨的影响。

表 4 径流及溶解态氮磷流失量与降雨特征参数相关分析

Table 4 Correlation analysis of runoff and dissolved nitrogen and phosphorus loss with rainfall characteristic parameters

指标 Index	径流量 Runoff	降雨量 Rainfall	降雨历时 Rainfall duration	I	I_{30}
径流量 Runoff	1	0.833 **	0.259	0.203	0.801 **
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.713 **	0.412 *	-0.112	0.380 *	0.449 **
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	0.762 **	0.627 **	0.091	0.189	0.641 **
可溶性磷 DP	0.570 **	0.502 **	0.023	0.196	0.548 **

$n=37$, * 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$), I 和 I_{30} 表示平均雨强和最大 30 min 降雨强度

3 讨论

3.1 甘蔗种植对坡面径流及氮磷流失的影响

作物种植是影响坡耕地地表径流及氮磷流失的重要因素^[5]。本研究中,2020 年植蔗坡地坡面径流总量

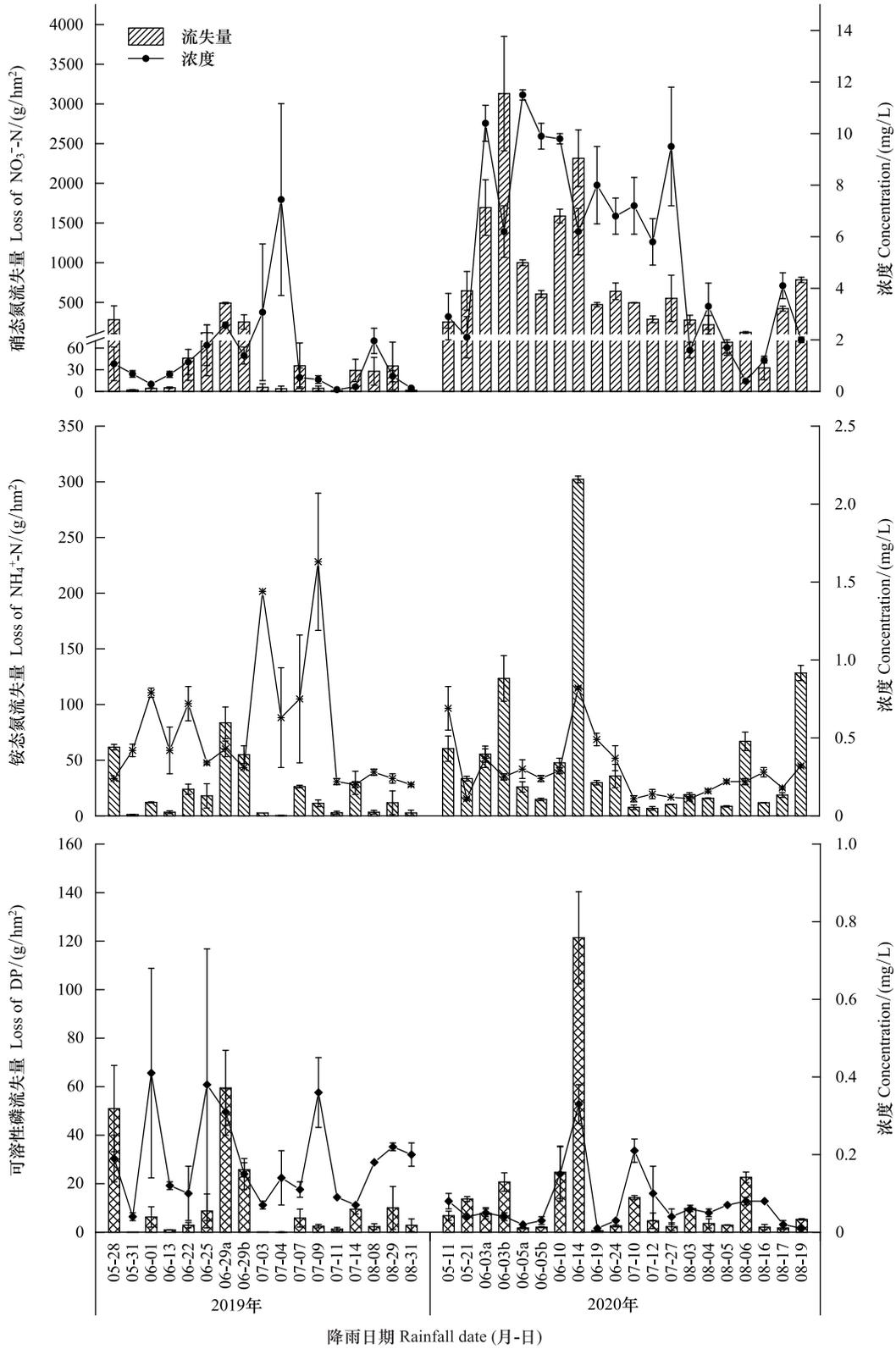


图 4 次降雨条件下溶解态氮磷流失特征

Fig.4 Characteristics of dissolved nitrogen and phosphorus loss under rainfall conditions

图中 a 和 b 表示同一日期内第一场和第二场降雨

为 $3269.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 对比类似降雨条件下的木薯地^[25], 侵蚀性降雨量相近, 但木薯地年径流量远小于蔗地, 一方面可能是由于坡面条件存在差异, 另一方面由于木薯地上部植株呈伞型, 能更好降低降雨动能, 减少地表径流。与玉米地坡面径流量相比^[20], 降雨条件接近时, 玉米坡耕地坡面径流远高于植蔗坡地, 主要原因是与玉米种植相比, 甘蔗植株和种植密度更大, 对降雨的截留效应更为明显。

地表径流氮磷等养分流失过程是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程^[26], 并受作物种植的影响^[14]。本研究中, 2019 与 2020 年植蔗坡地硝态氮和铵态氮流失量均高于玉米地^[20], 可能是由于玉米生长周期较短, 土壤养分在较短时间内被其吸收利用^[27], 使地表径流及坡面土壤养分变化存在较大差异所致。在相似降雨量下, 与花生、红薯地^[16]相比, 蔗地硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失量均明显偏高, 除土壤类型不同外, 可能的原因是试验时期地表覆盖度存在差异, 本研究包含甘蔗生长的多个时期, 观测期内坡面地表覆盖度变化较大。同时本文研究结果还表明, 地表径流中溶解态氮素流失主要以硝态氮为主, 这与汪庆兵等^[18]的研究结果一致。

3.2 不同生长时期植蔗坡面径流及氮磷流失的动态特征

作物不同生长时期, 坡面植被盖度与作物生长状况不同, 进而影响坡面地表径流及氮磷养分流失特征^[19]。本文研究表明, 在相似的次降雨条件下, 甘蔗生长前期(7 月以前)坡面径流量整体高于甘蔗生长后期(图 3)。主要是因为甘蔗生长前期植被覆盖度小($<30\%$), 大部分降雨穿透植株直接击打土壤表面, 溅散土壤颗粒阻塞土壤孔隙, 阻碍水分下渗, 使得地表产流产沙较大^[28], 而在甘蔗生长后期, 蔗地覆盖度明显增大($>60\%$), 茂密的蔗叶和茎秆降低了雨滴动能和水流速度, 从而增加地表径流在土壤表层停留的时间, 增加了水分下渗, 使得地表径流减少^[29]。不同甘蔗生育期由于甘蔗植株对降雨的再分配不同, 余长洪等^[30]研究表明, 甘蔗幼苗期至成熟期, 穿透雨量从 94.7% 降至 49.4% , 而茎秆流则从 5.1% 增至 7.3% , 基于玉米植株对降雨的再分配的研究表明, 不同生育期玉米植株对降雨再分配(穿透雨量、茎秆流等)特征不同, 导致地表径流的汇集及形成方式存在明显差异, 进而影响坡面产流过程^[31]。地表径流是坡面养分流失的主要载体之一, 坡面养分流失过程是表层土壤养分与降雨、径流相互作用的过程^[6,26]。本文的研究结果表明, 甘蔗萌芽期和苗期是坡面养分的主要流失时期, 这与朱司航等^[16]和冯小杰等^[19]对玉米、花生等其他作物的研究结果相一致。主要原因此时植蔗坡地地表覆盖度小($<30\%$), 加之此时降雨相对集中(图 2), 从而导致坡面径流及其养分流失量均较大。因此在植蔗坡地的田间管理过程中, 应有针对性进行甘蔗生长前期的坡面水土流失防治, 通过增加地表覆盖等措施, 避免出现严重的水土流失问题。

3.3 降雨特征对植蔗坡面径流及氮磷养分流失的影响

降雨是引起地表径流和氮磷流失的重要影响因素^[32]。次降雨条件下坡面径流流失量随降雨量增大明显增加(图 3), 与李桂芳等^[25]研究结果相一致。2019 年 8 月以后, 次降雨下坡面径流量远低于 2020 年同期, 主要是受降雨量的影响。但降雨量并不是影响植蔗坡地径流量的唯一因素^[33], 例如, 2019 年 7 月 9 日降雨量(39.2 mm)高于 6 月 29 日的第一次降雨(29.2 mm), 但前者产生的径流量($8.0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)却明显低于后者($191.6 \text{ m}^3/\text{hm}^2$), 主要是由于 7 月 9 号降雨历时较长, 而平均降雨强度较小, 导致坡面径流量偏低。再次表明降雨对坡面径流的影响与降雨历时、降雨强度等其他降雨参数密切相关^[33]。此外, 相同降雨量下, 2020 年次降雨下坡面径流量总体高于 2019 年, 如 2019 年 6 月 25 日与 2020 年 6 月 24 日降雨量相近(分别为 25.0 mm 和 23.8 mm), 但后者坡面径流量是前者的 1.8 倍, 可能是由于此时期, 研究区降雨频繁, 连续降雨导致赤红壤坡面长期处于湿润状态^[34], 进而导致坡面径流量有所增加。

降雨对溶解态氮磷流失的影响主要是通过影响坡面径流量, 进而影响氮磷养分的流失量^[8]。次降雨下, 2019 与 2020 年硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失量总体上随次降雨呈波动变化, 且均在 6 月出现明显的峰值(表 3 与图 4), 主要原因是研究区 6 月降雨集中, 且降雨量大(图 2), 导致坡面径流增加, 从而导致坡面径流养分流失量增加。种植紫花苜蓿、香椿的坡耕地氮、磷流失量与降雨量呈显著正相关^[11], 本文研究与之相似。硝态氮、铵态氮和可溶性磷流失浓度同样随次降雨的变化表现出较大的波动性。次降雨下坡面硝态氮、铵态

氮和可溶性磷浓度与径流量及各降雨参数均表现为不显著相关关系。本研究中,硝态氮浓度明显受到降雨集中程度的影响,表现为在连续降雨下,硝态氮浓度呈明显下降趋势(图4),例如2020年6月3日第一场降雨下硝态氮浓度(10.4 mg/L)远高于第二场(6.2 mg/L),原因可能是硝态氮易溶解于水,在降雨初期,地表土壤中硝态氮易随坡面径流流失,而在连续降雨条件下,土壤中,尤其是表层土壤中的硝态氮含量在冲刷和淋溶的作用下有所减少,因此坡面径流中的硝态氮浓度有所减小,这与任秀文等^[35]、龙天渝等^[36]在模拟降雨条件下坡面径流中硝态氮流失浓度特征一致。有研究表明,铵态氮^[37]和可溶性磷^[38]浓度均随降雨时间的增加而下降,本研究中,这种关系并不明显,可能是由于以上研究基于模拟降雨条件,而本文基于自然降雨,在降雨条件上存在较大差异。此外,人类活动(施肥、耕作)也会使次降雨下径流中氮、磷浓度具有较大波动^[5]。

4 结论

(1)植蔗坡地地表径流量及溶解态氮磷流失量年内和年际均存在差异,主要与降雨的分布有关,2019年和2020年植蔗坡地地表径流及养分流失均集中在6月(占比>45%),且地表径流中溶解态氮素流失均以硝态氮为主(占比>79%)。因此,在甘蔗种植过程中要注意在此期间的坡面防治,合理进行田间活动和施肥管理。

(2)次降雨条件下,植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失量总体上随坡面降雨量的增加而增加,降雨量及最大30 min降雨强度与坡面径流量、硝态氮、铵态氮及可溶性磷流失量均呈极显著或显著正相关关系。在甘蔗生长后期,坡面径流中溶解态氮磷流失量均明显降低。次降雨条件下,径流中溶解态氮磷浓度均表现出较大的波动性,且总体上表现为在甘蔗生长前期(5—6月)呈上升趋势,甘蔗生长后期(7—8月)呈下降趋势。

参考文献(References):

- [1] Bouwman L, Goldewijk K K, van der Hoek K W, Beusen A H W, van Vuuren D P, Willems J, Rufino M C, Stehfest E. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900—2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52): 20882-20887.
- [2] 毛妍婷, 刘宏斌, 郭树芳, 杜彩艳, 杨艳鲜, 金桂梅, 陈安强, 雷宝坤, 刘晓冰. 耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 26-33.
- [3] Zhang Q W, Liu D H, Cheng S H, Huang X J. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 1-8.
- [4] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, Li H. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow. *Catena*, 2019, 173: 494-504.
- [5] 张洋, 樊芳玲, 周川, 倪九派, 谢德体. 三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响. *土壤学报*, 2016, 53(1): 189-201.
- [6] 安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 王彬. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响. *生态学报*, 2011, 31(24): 7579-7590.
- [7] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制. *生态学报*, 2018, 38(2): 624-634.
- [8] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, Jiang H, Xu Z X. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 2014, 514: 180-191.
- [9] Huang P, Zhang J B, Zhu A N, Li X P, Ma D H, Xin X L, Zhang C Z, Wu S J, Garland G, Pereira E I P. Nitrate accumulation and leaching potential reduced by coupled water and nitrogen management in the Huang-Huai-Hai Plain. *Science of the Total Environment*, 2018, 610-611: 1020-1028.
- [10] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 袁应飞, 赵龙山. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 131-140.
- [11] Xia L Z, Hoermann G, Ma L, Yang L Z. Reducing nitrogen and phosphorus losses from arable slope land with contour hedgerows and perennial alfalfa mulching in Three Gorges Area, China. *Catena*, 2013, 110: 86-94.
- [12] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 倪九派, 魏朝富. 紫色土区不同植物篱模式控制坡耕地氮素流失效应. *农业工程学报*, 2014, 30(23): 138-147.
- [13] Patin J, Mouche E, Ribolzi O, Sengtahevonghoung O, Latsachak K O, Soullieuth B, Chaplot V, Valentin C. Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: an analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 480-

494.

- [14] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 张鹏宇, 柴晶. 植被类型对黄土坡地产生产沙及氮磷流失的影响. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.
- [15] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, Wang H, Li N N. Soil erodibility affected by vegetation restoration on steep gully slopes on the Loess Plateau of China. *Soil Research*, 2018, 56(7): 712-723.
- [16] 朱司航, 王红, 周大迈, 张瑞芳, 朱子龙. 石灰岩地不同作物坡面土壤侵蚀和养分流失的影响. 水土保持学报, 2016, 30(3): 12-18.
- [17] 张铁钢, 李占斌, 李鹏, 徐国策, 刘晓君. 模拟降雨条件下不同种植方式的坡地氮素流失特征. 水土保持学报, 2016, 30(1): 5-8, 110-110.
- [18] 汪庆兵, 曹旖旎, 张建锋, 陈光才, 李泽波, 吴灏, 王丽. 浙江赋石水库集水区板栗林土壤氮素迁移特征. 应用生态学报, 2017, 28(2): 545-553.
- [19] 冯小杰, 郑子成, 李廷轩, 范丽. 暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征. 中国农业科学, 2018, 51(4): 738-749.
- [20] 王双, 叶良惠, 郑子成, 李廷轩. 玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究. 水土保持学报, 2018, 32(6): 28-33.
- [21] 马悦, 郭年冬, 张瑞芳, 周大迈, 王红, 张爱军. 片麻岩坡面花生不同生长期水土及养分流失规律. 水土保持研究, 2016, 23(5): 304-309.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [23] Li Y, Mo Y Q, Are K S, Huang Z G, Guo H, Tang C, Abegunrin T P, Qin Z H, Kang Z W, Wang X. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: evidence from hillslope observation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107289.
- [24] 谢如林, 谭宏伟, 周柳强, 黄金生, 黄美福, 黄献华, 董文斌, 王磊. 甘蔗种植体系水土及氮磷养分流失研究. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1572-1577.
- [25] 李桂芳, 杨任翔, 谢福倩, 梁志鑫, 安娟. 不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征. 水土保持学报, 2020, 34(2): 101-107, 230-230.
- [26] 邵明安, 张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型. 世界科技研究与发展, 2001, 23(2): 7-12.
- [27] 张学林, 徐钧, 安婷婷, 侯小畔, 李潮海. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2687-2699.
- [28] 焦银龙, 郑子成, 李廷轩, 林超文. 玉米季坡耕地地表糙度的变化及其对土壤溅蚀的影响. 水土保持学报, 2014, 28(6): 7-12, 18-18.
- [29] Garcia-estringana P, Alonso-Blázquez N, Alegre J. Water storage capacity, stemflow and water funneling in Mediterranean shrubs. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(3/4): 363-372.
- [30] 余长洪, 李就好, 陈凯, 姜俊红, 陈楚涓. 甘蔗冠层对降雨再分配的影响. 水土保持通报, 2015, 35(3): 85-87.
- [31] Zhao L S, Fang Q, Yang Y, Yang H, Yang T H, Zheng H. Stemflow contributions to soil erosion around the stem base under simulated maize-planted and rainfall conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 281: 107814.
- [32] Hou X K, Zhan X Y, Zhou F, Yan X Y, Gu B J, Reis S, Wu Y L, Liu H B, Piao S L, Tang Y H. Detection and attribution of nitrogen runoff trend in China's croplands. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 270-278.
- [33] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff; rainfall simulation on dryland soils, Fowlers Gap, Australia. *Hydrological Processes*, 2012, 26(15): 2211-2224.
- [34] 沈紫燕, 王辉, 平李娜, 龚恩磊, 胡传旺. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响. 水土保持学报, 2014, 28(1): 58-62.
- [35] 任秀文, 李开明, 刘爱萍, 姜国强. 模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 119-124.
- [36] 龙天渝, 刘祥章, 刘佳. 紫色土坡耕地硝态氮随壤中流迁移的时空分布模拟. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1973-1978.
- [37] 钱婧, 张丽萍, 王小云, 付兴涛, 张芳芳, 王文艳, 刘俏. 人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响. 水土保持学报, 2012, 26(5): 6-10.
- [38] 代肖, 张海涛, 周大迈, 王红, 张瑞芳, 张爱军. 施肥对太行山区片麻岩山地水土流失和养分流失影响的研究. 河北农业大学学报, 2014, 37(1): 16-21.