模拟降雨条件下垄沟坡度对溶解态氮磷流失的影响

扈晓碟[1]，张含玉[1]，刘前进[1]，徐相忠[1]，邱德勋[1]，马 良[2]

(1.山东省水土保持与环境保育重点实验室，临沂大学资源环境学院，山东 临沂 276005；
2.山东省水利科学研究院，山东水土保持学会，济南 250013)

摘要：为揭示不同垄沟坡度对径流中溶解态氮、磷流失的影响，采用人工模拟降雨试验，设置 4 个垄沟坡度处理(0°，9°，18°和 27°)，研究了不同垄沟坡度对径流中速效磷(PO_4^{3-}—P)、硝态氮(NO_3^-—N)和铵态氮(NH_4^+—N)浓度和流失量的影响；并利用 Inorganic—N/PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N/PO_4^{3-}—P 和 NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 3 种氮磷比，评价不同处理的富营养化风险。结果表明：(1)在降雨过程中，4 个垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 浓度随时间均呈锯齿状变化；其流失量随时间变化均呈先增加后以锯齿状变化的趋势，且波动幅度大，最大值(16.60，1 020.73，48.35 mg)分别出现在垄沟坡度为 0°，0°和 9°处理。(2)4 个垄沟坡度处理间相比较，径流中 PO_4^{3-}—P 和 NH_4^+—N 流失量均表现为 0°＞9°＞27°＞18°，其浓度最大值(0.50，1.08 mg/L)和最小值(0.37，0.76 mg/L)均分别出现在垄沟坡度为 9°和 18°处理；而径流中 NO_3^-—N 浓度和流失量均在垄沟坡度 0°处理时为最大值(30.68 mg/L 和 64.16 mg/m²)，18°处理时为最小值(21.78 mg/L 和 42.22 mg/m²)。(3)Inorganic—N/PO_4^{3-}—P 率和 NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率表明 4 个垄沟坡度处理径流中均存在一定的富营养化风险。其中，垄沟坡度为 0°处理的径流富营养化风险水平最高，27°处理的径流富营养化风险水平最低。研究结果可为横坡垄作的水土流失及养分流失评价、预测以及防治提供科学依据。

关键词：横坡垄作；垄沟坡度；模拟降雨；氮磷流失；富营养化风险

中图分类号：S157.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2019)06-0041-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.006

Impact of Furrow Slopes on Losses of Dissolved Nitrogen and Phosphorus Under Simulated Rainfall

HU Xiaodie[1], ZHANG Hanyu[1], LIU Qianjin[1], XU Xiangzhong[1], QIU Dexun[1], MA Liang[2]

(1.*Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong* 276005; 2.*Water Resources Research Institute of Shandong Province, Shandong Society of Soil and Water Conservation, Ji'nan* 250013)

Abstract: This study explored the effects of four furrow slopes (0°, 9°, 18° and 27°) on the concentrations and losses of PO_4^{3-}—P, NO_3^-—N and NH_4^+—N through simulated rainfall experiments, and evaluated eutrophication risk of the runoff by the ratios of Inorganic—N/PO_4^{3-}—P, NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P, and NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P. The results were as follow: (1) PO_4^{3-}—P, NO_3^-—N, and NH_4^+—N concentrations changed in the shape of wavy serrated shape with rainfall time under four furrow slopes. As for losses, their maximum value (16.60, 1 020.73, 48.35 mg) appeared in 0°, 0°, and 9° when they increased firstly and then changed in zigzag shape with rainfall time. (2) Under different furrow slopes, PO_4^{3-}—P and NH_4^+—N losses in runoff water were in order of 0°＞9°＞27°＞18°, whose concentration maximum value (0.50, 1.08 mg/L) and minimum value (0.37, 0.76 mg/L) appeared in 9° and 18°. NH_4^+—N concentration and losses maximum value (30.68 mg/L and 64.16 mg/m²) and minimum value (21.78 mg/L and 42.22 mg/m²) appeared in 0° and 18° in runoff water. (3) The ratios of Inorganic—N/PO_4^{3-}—P and NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P showed that four furrow slopes output runoff all had eutrophication risk, and the 0° output runoff of that was the highest and the 27° was the lowest. These findings would provide scientific guidance for evaluation,

收稿日期：2019-05-23

资助项目：国家自然科学基金项目(41701311，41571261)；山东省自然科学基金项目(ZR2017JL019，ZR2017PD003)；山东水土保持学会重点领域创新项目(2018003)；山东省重点研发计划项目(2018GSF117001)

第一作者：扈晓碟(1996—)，女，山东临沂人，本科生，主要从事土壤侵蚀与非点源污染研究。E-mail：2450918935@qq.com

通信作者：张含玉(1987—)，女，山东临沂人，博士，讲师，主要从事土壤侵蚀与非点源污染研究。E-mail：zhanghanyu@lyu.edu.cn

prediction, and control of soil and water loss and nutrient loss in contour ridge system.

Keywords: contour ridge system; furrow slopes; simulated rainfall; loss of nitrogen and phosphorus; eutrophication risk

非点源污染目前已成为影响水体环境质量,引起水体富营养化的重要污染类型[1-2]。氮、磷等非点源污染物在降雨径流作用下离开水—土界面,汇入受纳水体,引发地表水体富营养化并加速水环境的恶化[3-4]。因此,研究氮、磷的径流流失过程及其影响因子既是环境问题,也是当前国内外较为关注的热点问题[5-6]。

横坡垄作能汇集雨水,增加雨水就地入渗,进而减少地表径流,起到保持水土、减少养分流失的作用[7],是雨养农作物栽培中被广泛应用的保护性耕作措施,在棕壤丘陵地区已普遍推广[8-9]。林超文等[10]发现,在紫色土坡耕地条件下,横坡垄作有增加地下径流和氮流失量的趋势,能够有效控制磷流失;于兴修等[11]研究表明,与传统顺坡垄作相比,相同雨强下横坡垄作可有效控制径流并减少溶解态无机氮和溶解态磷的输出率;陈静蕊等[12]通过田间小区试验发现,横坡垄作能够降低不同作物生长季及休闲季径流中氮、磷浓度的均值及最大值。

垄沟坡度作为横坡垄作系统中最为重要的参数之一[13],在一定程度上决定了垄间雨水汇集量和横垄土壤侵蚀强度[14],进而引起养分流失机制的改变。由此可见,明确垄沟坡度对溶解态氮、磷流失的影响,有助于降低非点源污染物的输出风险。目前,关于横坡垄作系统中垄沟坡度对养分流失的影响研究较少,致使准确评价养分流失状况的基础资料缺乏,难以有针对性地指导横垄耕作。本研究以野外原位棕壤横垄为研究对象,采用人工模拟降雨的方法,分析不同垄沟坡度对径流中溶解态氮、磷浓度和流失量的影响机制,评价其富营养化风险,为非点源污染的防治和横坡垄作的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于 2017 年 10 月 5—9 日在山东省蒙阴县试验田(35°42′N,117°57′E)进行。该地气候类型为温带季风气候,降雨多集中在 6—9 月,土壤类型为棕壤。基于当地实际自然情况,试验设计 4 个径流小区,长 9 m,宽 4 m。试验期间植被均被移除,坡面为裸坡,坡度均控制在 8°~9°范围内。小区两侧及顶端边缘用 30 cm 高的 PVC 板和薄膜围成,薄膜包裹 PVC 板插入土中 20 cm,外露 10 cm,以防止降雨泥沙溅出小区及小区内外水分的渗透,小区下端安装不锈钢“V”形集水堰,用于降雨径流与泥沙的收集。基于实地调查,试验设计包括 4 个垄沟坡度处理:0°,9°,18°和 27°。其中,垄沟坡度 0°为平坡,作为对比处理,另外 3 个处理的垄高均设计为 12 cm,垄宽为 55 cm。

人工模拟降雨试验装置是中国科学院水土保持研究所研制的由喷头系统、驱动系统、动力系统和供水系统 4 部分组成的 BX—1 型降雨器,该装置通过调节喷头经过喷水窗口的频率来控制雨强,具有携带方便,操作简单,模拟精度高等优点[15-16]。根据当地历年气候数据和侵蚀性降雨标准设置雨强为 100 mm/h,降雨历时为自降雨开始至产流后 100 min。其中,降雨的有效降雨面积为 6 m×10 m,降雨均匀度>0.89。

1.2 取样与分析方法

模拟降雨前 12 h,进行降雨强度为 20 mm/h、时长为 60 min 的预降雨,消除含水量给试验结果带来的影响,以确保每次试验前土表均匀性[17-18]。产流时间以坡面径流汇集至“V”形集水堰出口处为准,开始记录产流时间。每隔 5 min 用径流桶接 1 次样品,并用 500 mL 聚乙烯瓶接样,分别进行称重,到产流结束为止,记录产流停止的时间,结束降雨试验。每次降雨过程中,收集 200 mL 雨水用于测定其中氮、磷浓度的背景值,并在径流样品分析时扣除其影响。降雨结束后用 0.45 μm 微孔滤膜过滤聚乙烯瓶中样品,置于 2~6 ℃的便携式冰柜中用于化学分析。

采用紫外分光光度计测定径流水样中速效磷(PO_4^{3-}—P)、硝态氮(NO_3^-—N)和铵态氮(NH_4^+—N)的浓度。其中,PO_4^{3-}—P 采用钼锑抗比色法,NO_3^-—N 采用双波长系数法,NH_4^+—N 采用钠氏比色法。通过烘干称重法可计算径流量,径流量与浓度的乘积即为各养分流失量。径流中溶解态无机氮(Inorganic—N)为 NO_3^-—N 与 NH_4^+—N 之和[19],通过径流加权[15],计算不同垄沟坡度处理径流中平均 N/P 率,可比较不同垄沟坡度处理径流中富营养化风险水平。

试验数据采用 SPSS 16.0 统计软件进行方差分析,采用 Origin 9.1 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 垄沟坡度对溶解态氮、磷流失过程的影响

2.1.1 垄沟坡度对溶解态氮、磷浓度的影响 从图 1 可以看出,不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 的浓度均以锯齿状变化,平均值分别为 0.43,21.19,0.89 mg/L,NO_3^-—N 浓度高于 NH_4^+—N 的原因可能是,NH_4^+—N 中的 NH_4^+ 为阳离子,容易被土壤吸附[20],而 NO_3^-—N

属于可溶性养分,使其不易被吸附而溶于水中[21]。对于 PO_4^{3-}—P,垄沟坡度为 0°时的浓度整体呈下降趋势,在 35 min 处达到最大值 0.60 mg/L;垄沟坡度为 9°时,其浓度先增加后趋于稳定,且具有多峰值;垄沟坡度为 18°和 27°时,其浓度均呈先增加后缓慢减小的趋势,分别在 20,15 min 处达最大值 0.56,0.62 mg/L。PO_4^{3-}—P 浓度出现多峰值的原因可能是,该地污染物负荷较大,在降雨初期冲刷出存积污染物[18],导致 PO_4^{3-}—P 浓度对污染物负荷迅速响应[22],率先达到峰值,而后随着降雨冲刷作用引发的水土流失[18],使可溶性养分 PO_4^{3-}—P 在径流中进一步溶解又达到新一轮峰值。不同垄沟坡度处理径流中 NO_3^-—N 浓度均为 10.42～33.82 mg/L,与垄沟坡度 0°相比,垄沟坡度 9°,18°和 27°的峰值均具有一定的滞后性,这可能是因为横坡垄作具有蓄水作用,产流时间比平作慢[23],雨水在坡面停留时间较长,促进水分入渗,造成表层土壤中的部分 NO_3^-—N 淋失到土壤深层[11]。垄沟坡度为 0°时,NH_4^+—N 的浓度在 45,85 min 处出现 2 次峰值,分别为 1.71,1.90 mg/L;垄沟坡度为 9°时,NH_4^+—N 的浓度在前 70 min 内小幅度波动,在 75 min 处迅速达到峰值 1.99 mg/L;垄沟坡度为 18°和 27°时,NH_4^+—N 浓度均在 0.28～1.28 mg/L 间波动。

2.1.2　*垄沟坡度对溶解态氮、磷流失量的影响*　从图 2 可以看出,不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 流失量均整体呈先增加后以波动式变化的趋势,其平均值分别为 9.49,516.03,17.22 mg。垄沟坡度为 0°时,径流中 PO_4^{3-}—P 流失量在 2～15 min 内迅速增加,然后以大幅度波动状变化;垄沟坡度为 9°时,PO_4^{3-}—P 流失量整体呈增加趋势,在 85 min 达到最大值 15.85 mg;垄沟坡度 18°的变化趋势与 0°相似,但在 4～10 min 内处于较低水平的稳定状态,且迅速增加后波动变化幅度较小;垄沟坡度 27°的变化趋势与 9°相似,但在 10～60 min 内的波动变化幅度较大。垄沟坡度 0°处理径流中 PO_4^{3-}—P 流失早于其他 3 个处理的原因可能是:平作产流快,土壤侵蚀强度在降雨初期高于横坡垄作;横坡垄作对可溶性磷的控制作用高于平作[23]。4 个垄沟坡度处理径流中 NO_3^-—N 流失量随降雨进行均呈先迅速增加后以波浪锯齿状变化的趋势,且波动幅度大;径流中不同处理间 NH_4^+—N 流失量整体呈增加趋势,垄沟坡度为 9°时达到最大值 48.35 mg。NH_4^+—N 流失量迅速出现极大值的原因可能是,横坡垄作的拦蓄作用延长了径流与土壤表面相互作用的时间,促使吸附性养分 NH_4^+—N 向径流中释放和扩散[11]。

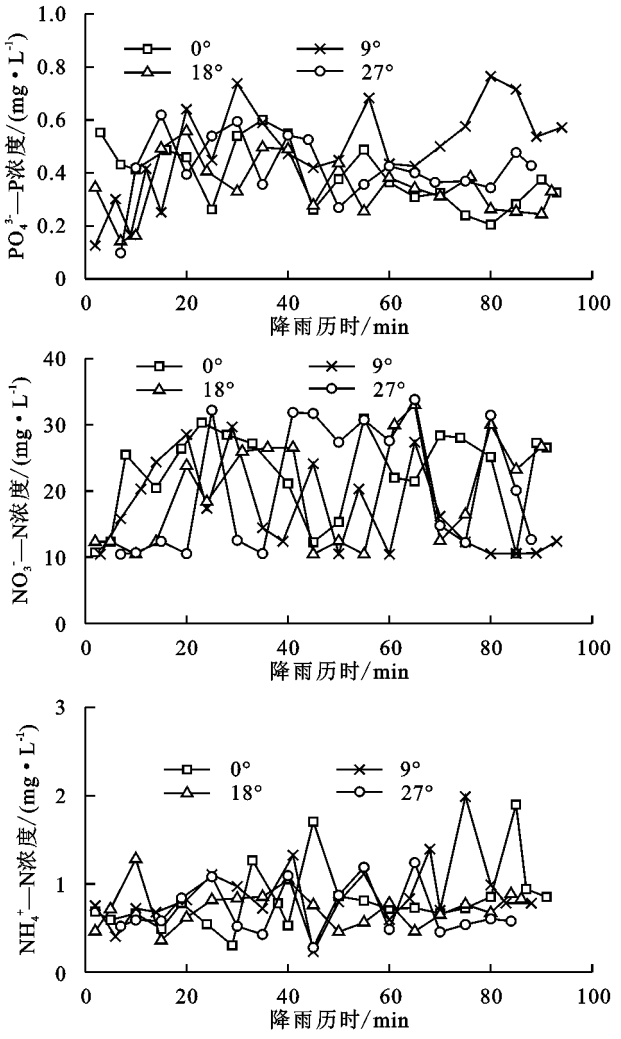


图 1　不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 浓度随降雨历时的变化过程

2.2　不同垄沟坡度处理溶解态氮、磷流失总体特征

从图 3 可以看出,不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 的浓度和流失量均差异明显,PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 的浓度为整个降雨过程中的平均浓度,流失量为降雨过程各时间段的累加。其中,不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P 浓度和流失量均在 $p<0.01$ 水平上存在极显著差异(表 1,表 2),其浓度表现为 9°>27°>0°>18°,说明 PO_4^{3-}—P 浓度随垄沟坡度的增加呈先增加再减小最后又增加的趋势。与垄沟坡度 0°相比,垄沟坡度 9°和 27°处理径流中 PO_4^{3-}—P 浓度分别增加 19.3%和 4.4%,垄沟坡度为 18°处理的 PO_4^{3-}—P 浓度减少 11.5%;径流中 PO_4^{3-}—P 流失量表现为 0°>27°>9°>18°,表明垄沟坡度 18°有助于控制 PO_4^{3-}—P 流失。与垄沟坡度 0°相比,9°,18°和 27°处理的 PO_4^{3-}—P 流失量分别减小 12.7%,29.0%和 22.1%。

不同垄沟坡度处理径流中 NO_3^-—N 的浓度表现为 0°>27°>18°>9°,随垄沟坡度的增加呈先减小后逐渐增大的趋势。与垄沟坡度 0°相比,垄沟坡度

为 9°,18°和 27°处理径流中 NO_3^-—N 浓度分别减少 12.2%,3.8%和 0.5%;径流中 NO_3^-—N 流失量表现为 0°>18°>27°>9°,与垄沟坡度 0°相比,垄沟坡度为 9°,18°和 27°处理的 NO_3^-—N 流失量分别减少 34.6%,21.6%和 24.5%。表明垄沟坡度 9°有助于控制 NO_3^-—N 流失,而 0°增加了 NO_3^-—N 流失。不同垄沟坡度处理间 NO_3^-—N 流失量差异显著($p<0.01$),而 NO_3^-—N 浓度不具有显著差异性(表 1,表 2),又因为流失量取决于径流量和浓度的大小[21],说明径流量是导致垄沟坡度间 NO_3^-—N 流失的主要因素。

不同处理间径流中 NH_4^+—N 浓度和流失量均不具有显著性差异(表 1,表 2),其浓度表现为垄沟坡度 9°>0°>27°>18°。垄沟坡度 9°的 NH_4^+—N 浓度比坡度 0°增加 20.6%,而垄沟坡度为 18°和 27°的 NH_4^+—N 浓度比 0°分别减少 14.9%和 7.8%;不同垄沟坡度处理径流中 NH_4^+—N 流失量表现为 0°>9°>27°>18°,表明随垄沟坡度的增加,径流中 NH_4^+—N 流失量呈先逐渐减小后增大的趋势,且垄沟坡度 18°有助于控制 NH_4^+—N 流失。与垄沟坡度 0°相比,垄沟坡度 9°,18°和 27°处理径流中 NH_4^+—N 的流失量分别减少 15.6%,34.2%和 33.1%。

2.3 不同垄沟坡度处理径流富营养化风险分析

水体富营养化问题是氮、磷元素共同作用所导致,因此,采用 N/P 率来衡量水体的富营养化程度相对于单一的氮素或磷素更具说服力[24-25]。同样,径流中溶解态无机氮和磷的比例也可用于衡量农田径流对受纳水体的富营养化风险[26]。Tejada 等[26]总结前人研究归纳出引起水体富营养化的 Inorganic—N/PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N/PO_4^{3-}—P 和 NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率分别在 5~60,5~15 和 6.4~25,并认为越接近上述范围,径流对受纳水体富营养化过程的贡献越高。

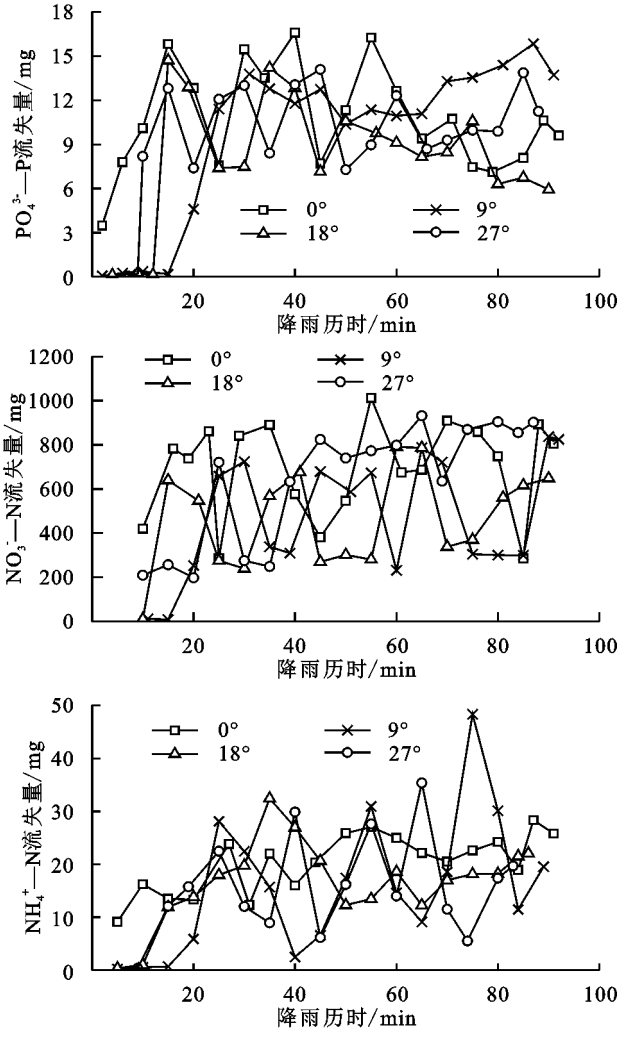


图 2 不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 流失量随时间的变化过程

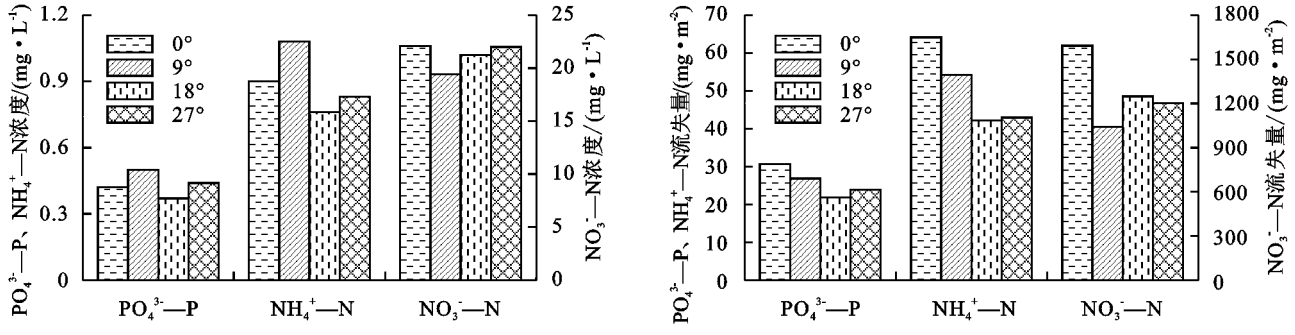


图 3 不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 的浓度和流失量

表 1 不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 的浓度差异性

项目	均方和	自由度	均方值	显著性
PO_4^{3-}—P	0.54	3	0.18	0
NO_3^-—N	244.25	3	81.42	0.31
NH_4^+—N	1.67	3	0.56	0.60

从表 3 可以看出,不同垄沟坡度处理下 Inorganic—N/PO_4^{3-}—P 率均位于其相应富营养化风险范围内,NO_3^-—N/PO_4^{3-}—P 率则远高于其相应风险范围,而 NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率则接近其相应风险范围;Inorganic—N/PO_4^{3-}—P 和 NO_3^-—N/PO_4^{3-}—P 率随垄沟坡度的增加,其变化趋势与径流量一致,均呈先减小再增加最后又减小的趋势;NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率随垄沟坡度增加呈逐渐减小的趋势,且变化幅度不断增大。与垄沟坡度 0°相

比,坡度 9°,18°和 27°处理的 NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率分别减少 3.3%,7.2%和 14.1%。

表 2　不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 的流失量差异性

项目	均方和	自由度	均方值	显著性
PO_4^{3-}—P	0.41	3	0.14	0
NO_3^-—N	1891.39	3	630.46	0
NH_4^+—N	2.39	3	0.80	0.17

上述分析表明,不同垄沟坡度处理径流中富营养化风险程度表现为 0°>9°>18°>27°,即径流中富营养化风险水平随垄沟坡度的增加逐渐增大。说明垄沟坡度 27°较其他 3 个处理可降低径流的富营养化风险水平,减轻对受纳水体富营养化的影响,而垄沟坡度 0°的富营养化风险水平最高。试验结果与以往研究结果一致,即在垄沟坡度为 0°处理的平坡条件下,地表径流量最大,对坡地冲刷作用强烈[27],促进土壤侵蚀[10],而横坡垄作可减缓坡度,缩短坡长,有效减少径流[28]。表明横坡垄作起到蓄水保水的作用,有助于控制养分流失。

表 3　不同垄沟坡度处理径流中平均 N/P 率

垄沟坡度/(°)	径流量/(kg·m^{-2})	Inorganic—N/PO_4^{3-}—P 率	NO_3^-—N/PO_4^{3-}—P 率	NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率
0	72.32	53.99	51.90	2.09
9	52.47	40.89	38.87	2.02
18	57.60	59.25	57.31	1.94
27	53.74	52.08	50.28	1.80
显著性 Sig.	0	0	0	0

3　结论

(1)不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 浓度分别表现为 9°>27°>0°>18°,0°>27°>18°>9°和 9°>0°>27°>18°。径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 浓度均以锯齿状发生变化。与垄沟坡度 0°相比,垄沟坡度 9°,18°和 27°的 NO_3^-—N 浓度峰值具有一定的滞后性。

(2)4 个垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P 和 NH_4^+—N 流失量均表现为 0°>9°>27°>18°,而 NO_3^-—N 流失量表现为 0°>18°>27°>9°。径流中 PO_4^{3-}—P、NO_3^-—N 和 NH_4^+—N 流失量随降雨进行均呈先增加后以锯齿状变化的趋势,且波动幅度大,最大值(16.60,1020.73,48.35 mg)分别出现在垄沟坡度为 0°,0°和 9°处理。

(3)不同垄沟坡度处理径流中 PO_4^{3-}—P 和 NO_3^-—N 的流失量在 $p<0.01$ 水平上均存在显著差异,而 NH_4^+—N 浓度和流失量均不具有显著差异性。垄沟坡度 18°处理有助于控制 PO_4^{3-}—P 和 NH_4^+—N 流失,9°有助于控制 NO_3^-—N 流失。

(4)Inorganic—N/PO_4^{3-}—P 率(40.89~59.25)和 NH_4^+—N/PO_4^{3-}—P 率(1.80~2.09)表明 4 个处理径流中均存在一定的富营养化风险,且不同垄沟坡度处理径流中富营养化风险程度表现为 0°>9°>18°>27°。说明垄沟坡度 27°处理能够降低径流的富营养化风险水平,从而有效减轻径流对受纳水体富营养化的影响,可为蒙阴地区横坡垄作的合理利用提供科学依据。

参考文献:

[1] 马骞,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同覆被棕壤理化特征对径流溶解态氮磷输出的影响[J].环境科学学报,2011,31(7):1526-1536.

[2] 李建华,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同植被模式下坡耕花生地垄间水土流失与磷素输出[J].应用生态学报,2012,23(12):3347-3354.

[3] 于兴修,李振炜,刘前进,等.沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J].环境科学,2012,33(8):2644-2651.

[4] 雷沛,曾祉祥,张洪,等.丹江口水库农业径流小区土壤氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(3):44-48.

[5] 于兴修,马骞,刘前进,等.不同覆被土壤结构稳定性对侵蚀泥沙氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):12-16.

[6] Liu Q J, Zhang H Y, An J, et al. Soil erosion processes on row side slopes within contour ridging systems[J]. Catena,2014,115:11-18.

[7] 刘前进.棕壤横垄土壤侵蚀特征及其影响因素[D].武汉:华中农业大学,2014.

[8] 何淑勤,郑子成,孔祥东.川中丘陵区坡耕地耕作技术效益分析[J].中国水土保持,2013(11):73-76.

[9] 刘琳.横垄渗流及其侵蚀微地貌特征[D].济南:山东师范大学,2015.

[10] 林超文,陈一兵,黄晶晶,等.不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J].中国农业科学,2007,40(10):2241-2249.

[11] 于兴修,马骞,刘前进,等.横坡与顺坡垄作径流氮磷输出及其富营养化风险对比研究[J].环境科学,2011,32(2):428-436.

[12] 陈静蕊,刘佳,王惠明,等.保护性耕作措施对陡坡地养分流失的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1):146-152.

[13] Foster G R. Draft science documentation, revised universal soil loss equation version 2 (RUSLE2) [M]. Washington D C: Agricultural Research Service. US Department of Agriculture, 2005.

[14] Hessel R, Messing I, Chen L D, et al. Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment[J].Catena,2003,54(1):289-302.

[15] 马骞,于兴修,刘前进.横坡耕作径流溶解态氮磷流失特征及其富营养化风险:以鲁中南山地丘陵区为例[J].农业环境科学学报,2011,30(3):492-499.

[16] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.
[17] 刘琳,刘前进,于兴修.横坡垄作细沟形态特征及其影响因素[J].绿色科技,2015(4):167-171.
[18] 李振炜,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J].环境科学,2012,33(4):1152-1158.
[19] Barbosa F T, Bertol I, Luciano R V, et al. Phosphorus losses in water and sediments in runoff of the water erosion in oat and vetch crops seed in contour and downhill[J].Soil and Tillage Research,2009,106(1):22-28.
[20] 温小乐,夏立江,徐亚萍,等.生活垃圾渗滤液对堆填区周边土壤铵态氮吸附能力的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(3):503-507.
[21] 梁改革,安娟,屈传新.壤中流条件下垄向坡度对氮和磷流失的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):118-124.
[22] 蒋锐,朱波,唐家良,等.紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量[J].水利学报,2009,40(6):659-666.
[23] 何晓玲,郑子成,李廷轩.不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J].中国农业科学,2013,46(12):2492-2500.
[24] Pizzolon L, Tracanna B, Porsperi C, et al. Cyanobacterial blooms in Argentinean island waters[J]. Lakes and Reservoirs: Research and Management,1999,4(3/4):101-105.
[25] Tejada M, Benitez C, Gonzalez J L. Effects of application of two organomineral fertilizers on nutrient leaching losses and wheat crop[J]. Agronomy Journal, 2005,97(3):960-967.
[26] Tejada M, Gonzalez J L. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality[J]. Geoderma, 2008,145(3/4):325-334.
[27] 陶春.耕作措施对三峡库区旱坡地氮、磷流失的影响研究[D].重庆:西南大学,2010.
[28] 史彦林,陈生永,刘建新,等.东北黑耕土区不同作措施保水保土效应研究[J].中国水土保持,2019(1):47-49.

(上接第 40 页)

[24] Oenema O, Kros H, de Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. European Journal of Agronomy,2003,20(12):3-16.
[25] 张翔,毛家伟,司贤宗,等.施氮时期对夏花生产量及氮素吸收利用的影响[J].中国油料作物学报,2015,37(6):897-901.
[26] 石辉,刘世荣.森林土壤大孔隙特征及其生态水文学意义[J].山地学报,2005,23(5):533-539.
[27] 王洪杰,李宪文,史学正,等.四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J].土壤通报,2002,33(6):441-444.
[28] 袁东海,王兆骞,陈欣,等.不同农作方式红壤坡耕地土壤氮素流失特征[J].应用生态学报,2002,13(7):863-866.
[29] 张宇,荣湘民,王心星,等.覆盖与生态拦截对旱地土壤地表径流和氮素流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):15-19.
[30] 张展羽,左长清,刘玉含,等.水土保持综合措施对红壤坡地养分流失作用过程研究[J].农业工程学报,2008,24(11):41-45.
[31] 王全九,穆天亮,王辉,等.土壤溶质随径流迁移基本特征分析[J].水土保持研究,2008,15(6):38-41.
[32] 陈晓安,杨洁,郑太辉,等.赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征[J].农业工程学报,2015,31(17):162-167.
[33] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J].水土保持学报,2018,32(6):28-33.