

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

于兴修¹, 马骞², 刘前进¹, 吕国安²

(1. 临沂师范学院化学与资源环境学院, 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂 276005; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:以沂蒙山区典型的坡耕地为例, 通过 2 种雨强 ($40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $70 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) 下的野外原位模拟降雨试验, 分析了横坡与顺坡垄作地表径流溶解态无机氮 Inorganic-N (NO_3^- -N、 NH_4^+ -N) 以及溶解态磷 (DP) 的输出特征, 并利用 Inorganic-N/DP、 NO_3^- -N/DP 和 NH_4^+ -N/DP 等 3 种氮磷比对 2 种耕作方式径流的富营养化风险进行比较. 结果表明, 与传统顺坡垄作相比, 相同雨强下, 横坡垄作径流中 DP 浓度增加, 而不同形态 Inorganic-N 浓度的变化不一致; 横坡垄作可有效地控制径流并减少径流 Inorganic-N 和 DP 的输出率; 雨强增大时, 横坡较顺坡垄作控制径流的效果增强, 其径流 Inorganic-N 和 DP 的输出量也大幅度减少, 其中, $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下可分别减少 43% 与 5%, $70 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下分别为 68% 与 55%. 较高的 Inorganic-N/DP 和 NO_3^- -N/DP 率表明, 2 种耕作方式下的径流均存在一定程度的富营养化风险, 且风险水平在降雨过程中呈增加趋势, 但横坡较顺坡垄作不仅能够明显地延缓这一增加趋势, 而且可降低径流的富营养化风险水平, 从而相应减轻坡耕地径流对于接纳水体富营养化过程的影响.

关键词:横坡垄作; 顺坡垄作; 径流; 氮磷输出; 富营养化风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2011) 02-0428-09

Comparative Study of N, P Output and Eutrophication Risk in Runoff Water in Cross Ridge and Longitudinal Ridge

YU Xing-xiu¹, MA Qian², LIU Qian-jin¹, LÜ Guo-an²

(1. Shandong Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, School of Chemistry and Resources Environment, Linyi Normal University, Linyi 276005, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Field in-situ rainfall simulation tests with two rainfall intensities ($40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ and $70 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), which were conducted at typical sloping cropland in Yimeng mountainous area, were designed to analyze the output characteristics of dissolved inorganic nitrogen, Inorganic-N (NO_3^- -N, NH_4^+ -N) and dissolved phosphorus (DP) in runoff water, as well as to compare the eutrophication risk in this water by calculating three ratios of Inorganic-N/DP, NO_3^- -N/DP, and NH_4^+ -N/DP, respectively, in cross ridge and longitudinal ridge tillage methods. Results showed that, under the same rainfall intensity, the DP level in runoff water was higher in cross ridge than longitudinal ridge, while the change of different Inorganic-N level between the two tillage methods were not consistent. Cross ridge could effectively reduce runoff and the output rate of Inorganic-N and DP when compared to the longitudinal ridge tillage, which would be more outstanding with the increases of rainfall intensities. The losses of Inorganic-N and DP in runoff water were 43% and 5% less, respectively, in cross ridge than longitudinal ridge at the $40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ rainfall intensity, and were 68% and 55%, respectively, at $70 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. The higher Inorganic-N/DP and NO_3^- -N/DP ratios suggest that runoff water from either cross ridge or longitudinal ridge tillage have a certain eutrophication risk, which present an increasing trend during the precipitation-runoff process. Compared with longitudinal ridge, cross ridge can not only hinder the increasing trend of eutrophication risk, but also can significantly lower it, and thus effectively reduce the effect of sloping cropland runoff on the eutrophication processes of receiving waters.

Key words: cross ridge; longitudinal ridge; runoff water; output of nitrogen and phosphorus; eutrophication risk

近几十年来,为防治水体富营养化,缓解日趋紧张的水资源压力,农业地区氮、磷非点源污染物输出的评估与控制已成为世界范围内最重要的环境保护议题之一^[1]. 作为农业非点源污染物输出的最主要方式,土壤侵蚀与非点源污染密切相关^[2],大量研究表明非点源污染的关键源区往往是土壤侵蚀最为

收稿日期: 2010-03-24; 修订日期: 2010-05-20

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-08-0877); 山东省中青年科学家奖励基金项目 (2007BS08025); 山东省自然科学基金项目 (Y2008E23)

作者简介: 于兴修 (1967 ~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为资源利用与环境效应、流域非点源污染控制技术, E-mail: Yuxingxiu@lytu.edu.cn

严重的地区^[3-7]. 人类的农耕活动,特别是对坡地的开发利用会进一步加剧侵蚀,从而相应增加了坡地非点源污染物的输出风险^[5,8]. 为应对农业耕作引起的资源与环境方面的问题,已提出并应用了大量保护性耕作措施. 横坡垄作是防治坡耕地土壤侵蚀的经典措施之一,其防治土壤侵蚀的效益^[9-12]、机制^[13,14]已得到了广泛证实和研究,也有部分文献对横坡垄作土壤养分的流失规律^[15-17]进行了报道,但比较而言,横坡垄作的非点源污染效应值得进一步关注.

农田径流中的氮、磷元素是影响水环境的主要因子,特别是各种溶解态氮、磷非点源污染物,将直接关系到受纳水体的环境质量^[18,19]. 在以往的研究中,农田径流的非点源污染效应主要通过其氮、磷污染物的输出浓度或负荷来进行评估与比较^[20,21]. 水体富营养化问题是氮、磷元素的共同作用所导致,因此,采用氮磷比来衡量水体中藻类生物的生产力水平,即水体的富营养化程度,相对于单一的氮素或磷素则更具说明力^[22,23]. 同样,径流中溶解态氮、磷的比例也可以用于衡量农田径流对于受纳水体的富营养化的风险^[24],从而更为明确地反映其对水环境的潜在影响.

沂蒙山区是山东省土壤侵蚀最为严重的区域^[25],该区地形复杂多样,山地丘陵面积占总面积的60%以上. 农业在该地区占有极高的比重,受地形因素限制,坡地种植是该地区重要的农业生产方式之一. 本研究选择沂蒙山区典型的坡耕地,利用野外原位模拟降雨试验,在分析2种雨强下横坡与顺坡垄作地表径流中溶解态氮、磷输出特征的基础上,比较不同耕作措施地表径流的富营养化风险,以期对相关研究的开展及理论的完善提供依据.

1 材料与方 法

研究区位于沂蒙山区中西部的平邑县(图1),位于北纬 $35^{\circ}07' \sim 35^{\circ}43'$,东经 $117^{\circ}25' \sim 117^{\circ}56'$ 之间,属典型的暖温带大陆性季风气候,年平均气温 13.7°C ,多年平均降水量 803.4 mm ,总面积约为 1825 km^2 ,地势西北高并略向东南倾斜,山地丘陵面积占总面积的80%以上. 境内河流属淮河流域沂河水系,水资源较为丰富. 土地利用类型以耕地和宜林地为主,其中,耕地集中于 $6^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 的坡地上,种植作物主要为小麦、玉米、花生和金银花等. 该地区地带性土壤为棕壤,土壤表层夹杂大量石砾,肥力相对较低.

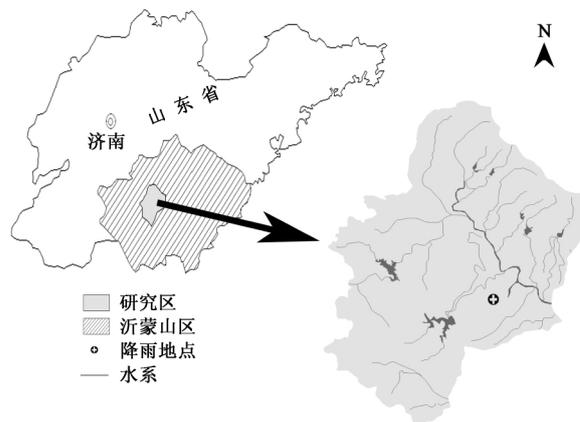


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

1.1 实验设计

模拟降雨试验于2008年9月初进行,地点位于平邑县的彭泉小流域(图1),土壤类型为棕壤,成土母质为酸性花岗岩. 选择典型横坡和顺坡垄作方式下的坡耕地并分别建立6个径流小区,横坡与顺坡垄作的垄台高度为 $9 \sim 13\text{ cm}$,垄沟宽度在 $20 \sim 25\text{ cm}$ 之间. 小区面积设计为 $2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m}$,其两侧及顶端边缘用 30 cm 高的PVC板和防水薄膜围成,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及小区内水分的渗透,在小区下端安装不锈钢V型集水堰,用于径流收集,12个径流小区的坡度控制在 $14^{\circ} \sim 16^{\circ}$ 之间. 根据研究区的气候资料,设计2种雨强,即当地最常见的 $40\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 及重现期为 2.5 a 的 $70\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. 耕作方式与雨强随机组合为4个处理,并重复3次. 全部处理分为2组,每组在相同雨强条件下比较不同耕作方式间径流氮磷输出特征的差异. 小区内种植作物均为花生,经调查,其施肥情况一致(降雨试验前 21 d ,尿素 $75\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,过磷酸钙 $110\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.2 模拟降雨装置

采用中国科学院水土保持研究所研制的BX-1型野外人工模拟降雨器,该装置携带方便,操作简单,具有较高的模拟精度,已被广泛应用于野外试验研究^[26,27]. 降雨器由喷头系统、驱动系统、动力系统和供水系统4部分组成. 降雨高度 3 m ,有效面积为 $3\text{ m} \times 5\text{ m}$,模拟 $40\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $70\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强的降雨均匀系数分别在85%和90%以上.

1.3 取样与分析方法

模拟降雨前对全部小区的土壤进行采样,采样位置位于以小区中心为圆点半径为 3 m 并在小区之外的区域,多点采样后混匀,以供实验室分析. 其中,

土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷、有机质、容重和含水量的测定参照标准方法进行,土壤颗粒组成及质

地利用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行分析. 试验小区土壤理化性状的平均值见表 1.

表 1 试验小区土壤的理化性状¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of experiment soil

试验小区	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	容重 /g·cm ⁻³	含水量 /%	粘粒 /%	粉粒 /%	沙粒 /%	质地
横坡 70/mm·h ⁻¹	1.04 (0.09)	0.78 (0.16)	42.9 (0.95)	29.0 (1.39)	7.69 (0.72)	1.64 (0.10)	6.96 (2.89)	4.09 (0.26)	44.8 (1.82)	51.1 (2.08)	砂质 壤土
顺坡 70/mm·h ⁻¹	1.08 (0.16)	0.76 (0.04)	37.3 (2.35)	20.8 (2.84)	9.58 (0.53)	1.66 (0.06)	12.0 (0.15)	3.70 (0.12)	44.0 (1.31)	52.3 (1.24)	砂质 壤土
横坡 40/mm·h ⁻¹	1.56 (0.34)	0.71 (0.15)	33.9 (2.56)	26.5 (0.97)	9.02 (1.40)	1.61 (0.09)	9.81 (4.43)	4.28 (0.40)	43.9 (2.73)	51.8 (3.13)	砂质 壤土
顺坡 40/mm·h ⁻¹	1.05 (0.03)	0.89 (0.12)	40.1 (4.69)	26.7 (2.40)	8.64 (1.68)	1.63 (0.09)	11.0 (0.39)	3.51 (0.25)	43.3 (0.49)	53.2 (0.38)	砂质 壤土

1) 括号内为标准差,下同

降雨历时设置为自降雨开始至产流后 30 min. 径流产生后,用带有刻度的聚乙烯瓶在集水堰出口处进行取样,取样间隔根据径流量的大小设置在 0.5 ~ 2 min 之间,3 次重复试验间的取样间隔保持一致. 入渗率通过各取样时段内的降雨量及径流量计算. 降雨结束后,全部径流样品经酸化后立即封存于 2 ~ 4℃ 的便携式冰柜中,并送往实验室进行分析. 模拟试验中的雨水为自来水,降雨前对其进行取样用于测定背景值. 分析项目包括径流水样中的溶解态 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和磷 (DP). 经测定,70% 左右径流样 NO₂⁻-N 含量低于检出限 (0.005 mg·L⁻¹), 根据文献 [16], 径流溶解态无机氮 (Inorganic-N) 为 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 之和. 测定时用烧杯分取部分径流样,经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定;靛苯酚蓝分光光度法用于测定 NH₄⁺-N 含量;DP 采用钼锑抗比色法测定. 3 次重复试验的分析结果表明,同一取样段各测定项目浓度

的相对误差介于 2.7% ~ 26.2% 间,为此,后面的讨论所采用的数据为扣除背景值后平行降雨实验所获数据的算术平均值.

1.4 数据处理

采用方差分析法对横坡与顺坡垄作径流样品的实验测试数据进行比较,显著水平设置为 0.05 和 0.01. 全部数据在 SPSS15.0 统计软件中进行分析.

2 结果与讨论

2.1 地表水文响应

分析降雨的地表水文响应是进一步研究地表溶质迁移的化学行为及其对水体环境影响的重要基础. 横坡与顺坡垄作小区地表土壤的水文参数见表 2. 可以看出,大雨强 (70 mm·h⁻¹) 下试验小区的平均径流率和稳定入渗率均高于小雨强 (40 mm·h⁻¹),而初始产流时间与产流所需降雨量则相反.

表 2 不同耕作方式下的地表水文响应¹⁾

Table 2 Soil hydrology response relative to different tillage methods

雨强/mm·h ⁻¹	耕作方式	产流时间 /s	产流降雨量 /mm	平均径流率 /mm·h ⁻¹	径流系数 /%	稳定入渗率 /mm·h ⁻¹
70	横坡	421(93)	8.07(1.94)	7.19(1.11)	10.4(1.82)	60.6(3.03)
	顺坡	440(71)	8.36(1.25)	20.8(1.32)	30.4(2.01)	41.6(2.28)
	ANOVA P	0.793	0.861	0.001**	0.001**	0.001**
40	横坡	1377(155)	15.2(2.21)	3.19(0.28)	8.02(0.50)	35.4(1.14)
	顺坡	803(181)	8.91(2.30)	5.35(1.24)	13.3(3.33)	33.8(2.09)
	ANOVA P	0.008**	0.023*	0.043*	0.049*	0.258

1) * 表示显著水平 0.05, ** 表示显著水平 0.01,下同;稳定入渗率为最后 3 次取样时段的平均值^[30]

小雨强下,横坡垄作的产流时间 (1377 s) 与产流降雨量 (15.22 mm) 均显著高于顺坡 (803 s、8.91 mm). 横坡垄作的垄台在阻碍坡面积水的汇流与移动的同时,促进了更多雨水的入渗,因此能延迟产

流. McIsaac 等^[28] 的研究也证明了这一点. 而大雨强下,2 种耕作方式间的产流时间与产流所需降雨量均无明显差别,且横坡垄作的上述 2 种水文参数略小于顺坡. 与小雨强下不一致的原因可能在于,雨

强增大后坡面入渗率下降快^[29],横坡垄作地表积水的增加较小雨强下变快,地表积水沿坡面方向的重力分量迅速增大并超过垄台的阻力,致使其在降雨开始后较快地向下移动,形成径流.由此也可以看出,雨强增大后横坡垄作延迟径流的作用将下降.

同一雨强下,横坡垄作的平均径流率和径流系数均明显低于顺坡,而稳定入渗率则较之增加,并在大雨强下达到显著水平.横坡垄作增加入渗、减少径流的作用在大量的田间自然降雨试验研究中也得到

了证实^[7-9].在本研究中,横坡与顺坡垄作相比,小雨强下可减少径流 40%,并提高稳定入渗率 5%,而在大雨强下则分别为 65% 和 46%.这说明雨强增大后横坡垄作控制径流的效果增强.

2.2 径流溶解态氮、磷的浓度特征

图 2~4 为 2 种雨强下横坡与顺坡垄作 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DP 浓度的径流过程.同时,本研究将径流过程分为初期(0~5 min)、中期(5~14 min)和末期(14~30 min)3 个时段,并通过径流加权计算不同时段各污染物的平均浓度,见表 3.

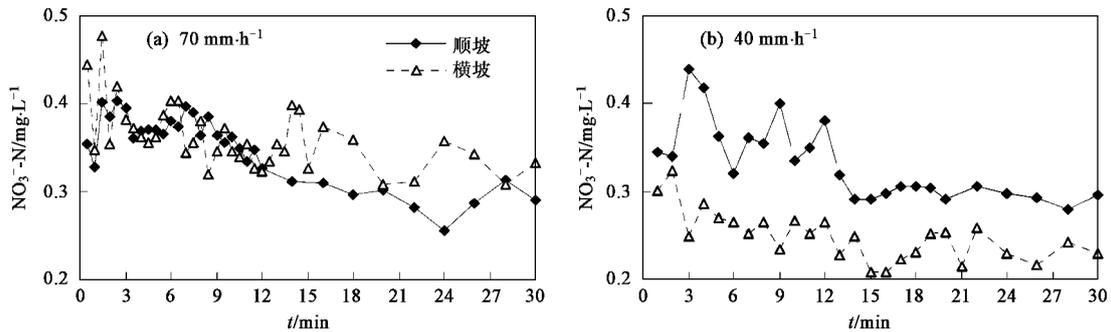


图 2 不同耕作方式下 NO_3^- -N 的径流输出特征

Fig. 2 Characteristics of NO_3^- -N in runoff water relative to different tillage methods

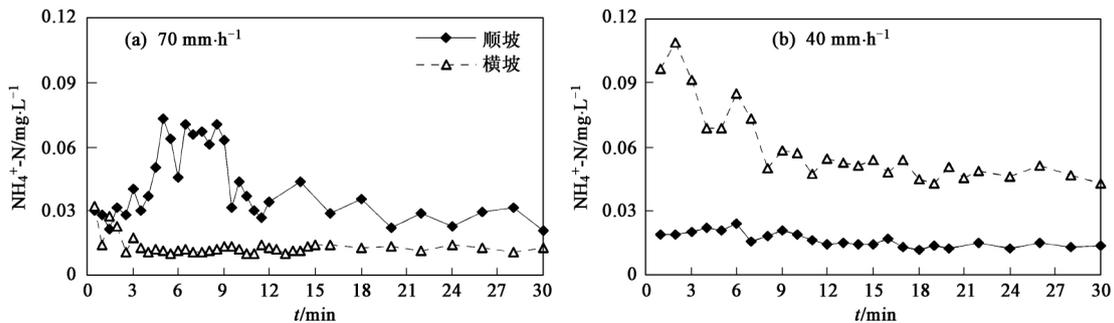


图 3 不同耕作方式下 NH_4^+ -N 的径流输出特征

Fig. 3 Characteristics of NH_4^+ -N in runoff water relative to different tillage methods

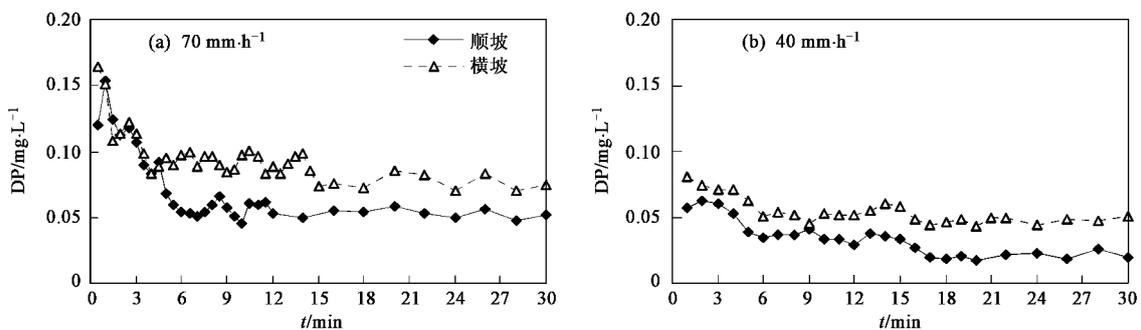


图 4 不同耕作方式下 DP 的径流输出特征

Fig. 4 Characteristics of dissolved phosphorus in runoff water relative to different tillage methods

表 3 不同径流时段溶解态氮、磷的平均浓度

Table 3 Average concentrations of dissolved nitrogen and phosphorus in different runoff time

雨强 /mm·h ⁻¹	耕作 方式	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹			NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹			DP/mg·L ⁻¹		
		初期	中期	后期	初期	中期	后期	初期	中期	后期
70	横坡	0.388	0.357	0.341	0.017	0.012	0.013	0.114	0.092	0.077
		(0.013)	(0.004)	(0.003)	(0.001)	(0.001)	(0.000)	(0.006)	(0.002)	(0.002)
	顺坡	0.373	0.361	0.292	0.037	0.050	0.027	0.107	0.056	0.053
		(0.025)	(0.005)	(0.005)	(0.007)	(0.005)	(0.007)	(0.002)	(0.001)	(0.001)
ANOVA P		0.056	0.447	0.001**	0.007**	0.001**	0.020*	0.092	0.001**	0.001**
40	横坡	0.286	0.253	0.231	0.087	0.059	0.048	0.072	0.052	0.048
		(0.006)	(0.014)	(0.004)	(0.003)	(0.001)	(0.001)	(0.000)	(0.011)	(0.015)
	顺坡	0.382	0.346	0.297	0.020	0.017	0.014	0.054	0.035	0.022
		(0.005)	(0.017)	(0.002)	(0.001)	(0.002)	(0.001)	(0.008)	(0.001)	(0.001)
ANOVA P		0.001**	0.002**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.049*	0.024*

径流样中NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和DP浓度的变化范围分别为0.227~0.459、0.011~0.075和0.013~0.153 mg·L⁻¹,这与大量田间试验的观测值域相近^[16, 26, 31-34],但也低于部分研究的结果^[15, 27],其主要原因是土壤和施肥的差异所致.径流过程中NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和DP的浓度均呈初高后低变化,并在径流后段逐渐趋于稳定(图2~4),这与多数坡地氮、磷流失研究的结果一致^[26, 27, 33, 34].在土壤理化性状基本一致的情况下(表1),大雨强下试验小区径流的NO₃⁻-N和DP浓度基本高于小雨强,而NH₄⁺-N浓度受不同耕作方式的影响,并未随雨强变动表现出一致变动.

小雨强下,与顺坡垄作相比,横坡垄作径流过程中的NO₃⁻-N浓度下降,而NH₄⁺-N浓度反而增加.这与张兴昌^[15]的研究结论基本一致.横坡垄作导致2种形态氮素浓度变化不一致的原因可能在于,雨强较小时,横坡垄作推迟产流时间并蓄渗更多的降水(表2),造成表层土壤中大部分NO₃⁻-N在产流前已淋失到土壤深层;同时,横坡垄作对径流的拦蓄作用延长了径流与土壤表面相互作用的时间,促使吸附于土壤颗粒表面和溶解于土壤溶液中NH₄⁺-N更易向径流中释放和扩散,相应增加了径流中NH₄⁺-N浓度.

大雨强下的情况则相反,横坡垄作径流过程中的NO₃⁻-N浓度略高于顺坡,但区别在于径流末期达到显著水平;而各径流时段NH₄⁺-N的平均浓度均显著低于顺坡.这可能与雨强增大后2种耕作方式地表水文响应的变化有关,一方面大雨强下横坡垄作的产流较快(表2),产流前表层土壤NO₃⁻-N的淋溶损失较少,相应增加了NO₃⁻-N的径流输出;另一方面,顺坡垄作下产生的径流较多(表2),其对表层土壤的冲刷强烈,在促使更多土壤NH₄⁺-N溶解到径流的同时,还增大了泥沙流失量(观测表明,大雨强下

顺坡垄作的泥沙流失量是横坡的4.1~5.7倍),泥沙吸附的NH₄⁺-N在径流过程中解吸^[35],大大提升了径流中NH₄⁺-N的浓度.

相同雨强下,横坡垄作径流过程中的DP浓度均显著高于顺坡,其中,小雨强下横坡垄作径流初、中和末期DP平均浓度较顺坡的增幅分别为33%、49%和118%,大雨强下的增幅有所降低,分别为7%、64%和45%.横坡垄作径流DP浓度高于顺坡的原因可能在于:①延长了径流与地表土壤相互作用的时间,使得土壤中更多的磷向径流释放^[36];②产生径流少,其对DP的稀释作用较小.

综上所述,横坡与顺坡垄作相比:相同雨强下,径流中DP浓度增加,而不同形态溶解态无机氮(Inorganic-N)浓度的变化不一致;雨强增大后,DP浓度增加的幅度减小,Inorganic-N中浓度增加和降低的氮素类型改变.

2.3 径流溶解态氮、磷的平均输出速率

横坡与顺坡垄作间的径流量及其氮、磷浓度的差异将导致径流氮、磷输出量的不同.通过计算径流NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、Inorganic-N和DP的平均输出速率(表4),可以看出,大雨强下试验小区径流NO₃⁻-N和DP的平均输出速率均高于小雨强,虽然NH₄⁺-N的平均输出速率受不同耕作方式的影响未表现出随雨强一致的变化,但由于其在Inorganic-N中的比例较小,故此,Inorganic-N的平均输出速率也呈现出大雨强高于小雨强.

小雨强下,横坡较顺坡垄作增加了径流NH₄⁺-N的输出率,但径流NO₃⁻-N与Inorganic-N的单位输出量分别减少52%和43%;耕作方式间DP径流输出量的差异较小($p = 0.808$),横坡比顺坡垄作减少5%.而在大雨强下,横坡垄作径流NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、Inorganic-N和DP的输出率均显著低于顺坡,较顺

表 4 不同耕作方式径流中溶解态氮、磷的平均输出速率

Table 4 Average output rate of dissolved nitrogen and phosphorus in runoff water relative to different tillage methods

雨强 /mm·h ⁻¹	耕作 方式	输出量/mg·(m ² ·h) ⁻¹			
		NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Inorganic-N	DP
70	横坡	2.53(0.24)	0.09(0.02)	2.62(0.25)	0.65(0.09)
	顺坡	7.22(0.51)	0.85(0.09)	8.08(0.45)	1.43(0.09)
	ANOVA P	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**
40	横坡	0.86(0.05)	0.21(0.01)	1.07(0.06)	0.19(0.05)
	顺坡	1.78(0.44)	0.09(0.03)	1.87(0.47)	0.20(0.04)
	ANOVA P	0.017*	0.005*	0.028*	0.808

坡分别减少 65%、89%、68% 和 55%。

横坡垄作通过减少径流,可以降低土壤溶质态氮磷的流失^[15]。而在本研究中,小雨强下横坡垄作减少径流的作用不及其增大径流 NH₄⁺-N 浓度的效应,因此,在一定程度导致 NH₄⁺-N 径流输出量的增加。但综合上述分析仍可以看出,横坡垄作可有效地控制坡耕地径流 Inorganic-N 和 DP 的输出。张兴昌^[15]的研究表明,横坡较传统耕作虽然增加了 NH₄⁺-N 的径流流失量,但可明显减少径流 NO₃⁻-N 和 Inorganic-N 的流失;Barbosa 等^[16]发现横坡相对于顺坡种植可显著减少 DP 随径流的流失;Stevens 等^[17]认为,虽然横坡较顺坡减少 DP 的径流流失量未达到显著水平($p > 0.05$),但明显的降低趋势仍显现出横坡耕作控制坡地径流 DP 流失的潜力。本研究观测结果与上述结论较为一致,并发现,雨强由 40 mm·h⁻¹ 增至 70 mm·h⁻¹ 时,横坡垄作减少径流 Inorganic-N 和 DP 输出的效果增强。

2.4 径流的富营养化风险分析

Tejada 等^[24]总结前人研究归纳出引起水体富营养化的 Inorganic-N/DP、NO₃⁻-N/DP 和 NH₄⁺-N/DP 率分别在 5~60、5~15 和 6.4~25 之间,并认为径流中的上述各种 N/P 率越远离这些范围,径流对接纳水体富营养化过程的贡献越低。本研究计算了横

坡与顺坡垄作降雨径流过程的 Inorganic-N/DP、NO₃⁻-N/DP 和 NH₄⁺-N/DP 率(图 5~7);并通过径流加权,进一步统计径流全程以及各时段的平均 N/P 率(表 5),用于对比 2 种耕作方式下坡耕地降雨径流的富营养化风险水平。

结合表 5 和图 5~7 可以看出,相同雨强下:①横坡与顺坡垄作径流的 NH₄⁺-N/DP 率均明显低于其相应风险范围下限(6.4),而 Inorganic-N/DP 和 NO₃⁻-N/DP 率则高于或接近其各自的下限值(均为 5);②不同耕作方式径流的 Inorganic-N/DP 和 NO₃⁻-N/DP 率在降雨过程中基本呈增加趋势,并在径流中、末期逐渐接近或超过其相应的风险范围下限;③顺坡垄作径流末期的平均 Inorganic-N/DP 和 NO₃⁻-N/DP 率较初期的增幅在 56%~92% 间,明显高于横坡垄作(12%~29%)。上述分析说明,虽然径流中的 NH₄⁺-N/DP 率较低,但相对较高的 Inorganic-N/DP 和 NO₃⁻-N/DP 率仍表明 2 种耕作方式下的径流均存在一定的富营养化风险,且风险水平在降雨过程中有增加趋势,而横坡较顺坡垄作能够有效延缓或抑制这一趋势。

鉴于 NH₄⁺-N/DP 率偏低,且远在其相应的富营养化风险范围之下,故此,只对其余 2 种 N/P 率在不同耕作方式间的差异进行比较。由表 5 可知,相同雨强下,横坡垄作径流全程的平均 Inorganic-N/DP

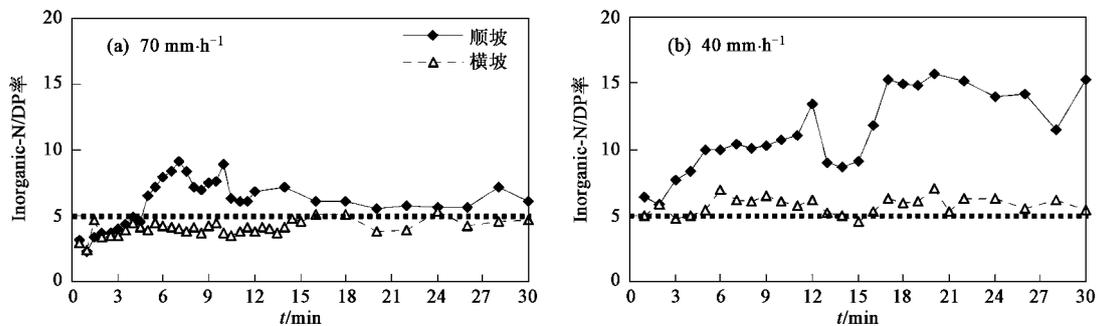


图 5 不同耕作方式下径流过程的 Inorganic-N/DP 率

Fig. 5 Inorganic-N/DP ratio in runoff process relative to different tillage methods

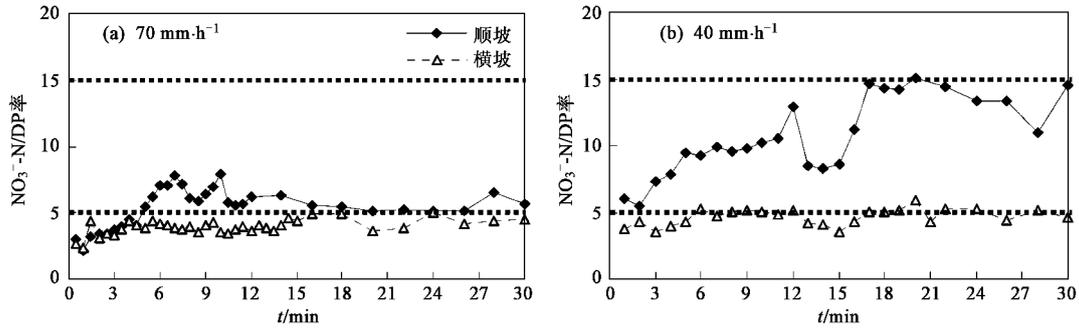
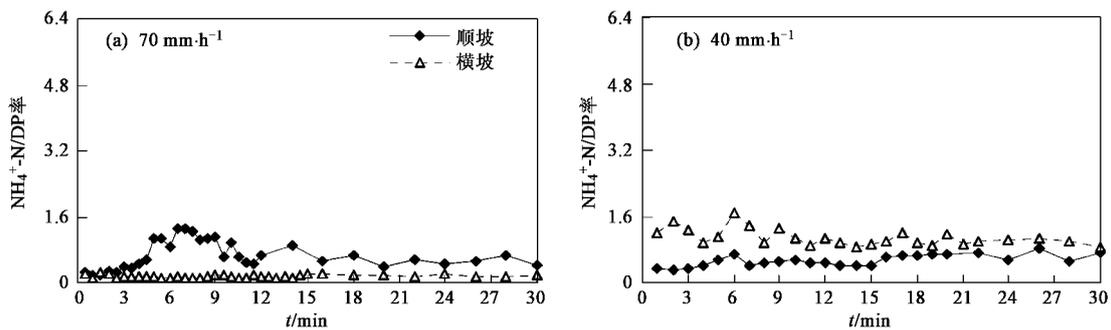
图6 不同耕作方式下径流过程的 NO_3^- -N/DP率Fig. 6 NO_3^- -N/DP ratio in runoff process relative to different tillage methods图7 不同耕作方式下径流过程的 NH_4^+ -N/DP率Fig. 7 NH_4^+ -N/DP ratio in runoff process relative to different tillage methods

表5 不同径流时段的平均N/P率

Table 5 Average N/P ratio in different runoff time

雨强 /mm·h ⁻¹	耕作 方式	Inorganic-N/DP率				NO_3^- -N/DP率				NH_4^+ -N/DP率			
		初期	中期	末期	全程	初期	中期	后期	全程	初期	中期	后期	全程
70	横坡	3.57 (0.29)	4.04 (0.07)	4.58 (0.11)	4.03 (0.15)	3.42 (0.28)	3.91 (0.08)	4.42 (0.10)	3.89 (0.05)	0.15 (0.01)	0.13 (0.01)	0.17 (0.01)	0.14 (0.00)
	顺坡	3.84 (0.24)	7.38 (0.21)	5.99 (0.09)	5.65 (0.14)	3.46 (0.28)	6.43 (0.23)	5.47 (0.15)	5.05 (0.19)	0.35 (0.06)	0.89 (0.09)	0.51 (0.12)	0.59 (0.08)
	ANOVA P	0.251	0.001**	0.001**	0.001**	0.688	0.001**	0.001**	0.001**	0.005**	0.001**	0.008**	0.001**
40	横坡	5.18 (0.10)	5.94 (0.95)	5.80 (1.78)	5.63 (0.82)	4.03 (0.09)	4.81 (0.74)	4.79 (1.45)	4.52 (1.08)	1.21 (0.04)	1.13 (0.22)	1.00 (0.33)	1.11 (0.25)
	顺坡	7.41 (1.25)	10.49 (0.51)	14.27 (0.32)	9.35 (0.28)	7.04 (1.17)	10.00 (0.47)	13.64 (0.32)	8.90 (0.24)	0.37 (0.07)	0.49 (0.04)	0.64 (0.05)	0.45 (0.04)
	ANOVA P	0.026*	0.003**	0.002**	0.004**	0.008**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.008**	0.063	0.012*

和 NO_3^- -N/DP率显著低于顺坡,其中,小雨强下较顺坡垄作分别减少42%和49%,而大雨强下的减少幅度下降,分别为29%和23%;不同雨强下,顺坡垄作径流全程的平均Inorganic-N/DP(5.65~9.35)和 NO_3^- -N/DP率(5.05~8.90)均在其相应的风险范围内,虽然小雨强下横坡垄作径流的上述2种N/P率也较高(分别为5.63和4.52),但相比顺坡垄作,2种雨强下横坡垄作径流的N/P率明显地远离其各自的风险范围.由此可认为,横坡较顺坡垄作可降低

坡耕地径流的富营养化风险水平,从而相应减轻对受纳水体富营养化的影响.

3 结论

(1)横坡垄作在 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下推迟产流时间的作用更为明显;相同雨强下,横坡垄作可有效地控制径流,雨强由 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 增至 $70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,控制径流的效果增强,较顺坡减少径流的幅度由40%增至65%.

(2)相同雨强下,横坡垄作径流中的 DP 浓度较顺坡增加,而不同形态 Inorganic-N 浓度的变化不一致,雨强增大,DP 浓度增加的幅度减小,Inorganic-N 中浓度增加和降低的氮素类型改变。

(3)横坡垄作可减少坡耕地径流 Inorganic-N 和 DP 的输出率,且这一作用在雨强较大时更为突出,其中,40 mm·h⁻¹雨强下较顺坡垄作可减少径流 Inorganic-N 和 DP 的输出率分别为 43% 与 5%,70 mm·h⁻¹雨强下分别为 68% 与 55%。

(4)较高的 Inorganic-N/DP 和 NO₃⁻-N/DP 率表明,2 种耕作方式的径流均存在一定程度的富营养化风险,且风险水平在降雨过程中呈增加趋势,横坡较顺坡垄作不仅能明显地延缓这一趋势,而且可降低径流的富营养化风险水平,从而相应减轻坡耕地径流对于接纳水体富营养化的影响。

参考文献:

- [1] Bechmann M, Stalnacke P, Kvaern S, *et al.* Integrated tool for risk assessment in agricultural management of soil erosion and losses of phosphorus and nitrogen [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(2): 749-759.
- [2] 刘建昌, 严岩, 刘峰, 等. 基于多因子指数集成的流域面源污染风险研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 599-606.
- [3] Ning S K, Chang N B, Jeng K Y, *et al.* Soil erosion and non-point source pollution impacts assessment with the aid of multi-temporal remote sensing images [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, **79**(1): 88-101.
- [4] Bechmann M, Stalnacke P, Kvaern S. Testing the Norwegian phosphorus index at the field and subcatchment scale [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, **120**(2-4): 117-128.
- [5] Zuazo V H, Pleguezuelo C R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers, a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, **28**(1): 65-86.
- [6] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 妫水河流域农耕地非点源磷污染危险性评价与关键源区识别[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 32-37.
- [7] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2690-2702.
- [8] Arnaez J, Lasanta T, Ruiz-Flano P, *et al.* Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**(2): 324-334.
- [9] Quinton J N, Catt J A. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England [J]. *Soil Use and Management*, 2004, **20**(3): 343-349.
- [10] 张少良, 张兴义, 刘晓冰, 等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(3): 11-15.
- [11] 朱青, 王兆骞, 尹迪信. 贵州坡耕地水土保持措施效益研究 [J]. *自然资源学报*, 2008, **23**(2): 219-229.
- [12] 付斌, 胡万里, 屈明, 等. 不同农作措施对云南红壤坡耕地径流调控研究[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(1): 17-20.
- [13] 雷孝章, 彭清娥, 曹叔尤, 等. 顺坡垄作改横坡垄作的水土保持神经网络模型[J]. *水土保持学报*, 2002, **16**(5): 50-53.
- [14] 沈昌蒲, 垄振平, 温锦涛. 横坡垄与顺坡垄的水土流失对比研究[J]. *水土保持通报*, 2005, **25**(4): 48-49, 80.
- [15] 张兴昌. 耕作及轮作对土壤氮素径流流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2002, **18**(1): 70-73.
- [16] 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.
- [17] Stevens C J, Quinton J N, Bailey A P, *et al.* The effects of minimal tillage, contour cultivation and in-field vegetative barriers on soil erosion and phosphorus loss[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, **106**(1): 145-151.
- [18] Alberts E E, Spomer, R G. Dissolved nitrogen and phosphorus in runoff from watersheds in conservation and conventional tillage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1985, **40**(1): 153-157.
- [19] Kim M, Gilley J E. Artificial neural network estimation of soil erosion and nutrient concentrations in runoff from land application areas[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, **64**(2): 268-275.
- [20] 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污染产出[J]. *地理学报*, 2004, **59**(3): 401-408.
- [21] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 668-672.
- [22] 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.
- [23] Tejada M, 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.
- [24] 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.
- [25] 尹民, 赵善伦, 孙希华. 山东省土壤侵蚀遥感调查与空间分析[J]. *水土保持学报*, 2002, **16**(5): 74-76, 104.
- [26] 庾刚, 李恒鹏, 金洋, 等. 模拟暴雨条件下农田磷素迁移特征[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 45-52.
- [27] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1763-1769.
- [28] McIsaac G F, Mitchell J K, Hirschi M C, *et al.* Conservation and contour tillage for corn and soybeans in the Tama silt loam soil: the hydrologic response [J]. *Soil and Tillage Research*,

- 1991, **19**(1): 29-46.
- [29] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing[J]. *Catena*, 2006, **66**(3): 211-220.
- [30] Kato H, Onda Y, Tanaka Y, *et al.* Field measurement of infiltration rate using an oscillating nozzle rainfall simulator in the cold, semiarid grassland of Mongolia [J]. *Catena*, 2009, **76**(3): 173-181.
- [31] 黄满湘, 章申, 张国梁, 等. 北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J]. *地理学报*, 2003, **58**(1): 147-154.
- [32] 焦平金, 许迪, 王少丽. 汛期不同作物种植模式下地表径流氮磷流失研究[J]. *水土保持学报*, 2009, **23**(2): 15-20.
- [33] 梁涛, 王红萍, 张秀梅, 等. 官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(4): 483-490.
- [34] 王晓龙, 李辉信, 胡锋, 等. 红壤小流域不同土地利用方式下土壤 N、P 流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(5): 31-34, 55.
- [35] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, **20**(3): 55-58.
- [36] 李裕元, 邵明安. 模拟降雨条件下施肥方法对坡面磷素流失的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(11): 1421-1424.