

DOI: 10.11766/trxb202305040172

陆淑宁, 李荣融, 姚冲, 吴发启. 横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J]. 土壤学报, 2024

LU Shuning, LI Rongrong, YAO Chong, WU Faqi. Study on the Effects of Counter Tillage on Runoff and Sediment Yield and Process of Nitrogen and Phosphorus Nutrient Loss on Sloping Farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024

横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究*

陆淑宁^{1,2}, 李荣融³, 姚冲^{1,2}, 吴发启^{1,3†}

(1.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 横坡垄作是一种常见的水土保持耕作措施, 它通过增大坡面拦蓄和入渗能力, 进而影响坡面土壤侵蚀过程。为揭示黄土坡耕地养分流失特征, 通过人工模拟降雨试验, 利用投影面积为 $4.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的径流小区, 设计降雨强度 ($90\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、5 个地表坡度 (3° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20°) 以及横坡垄作和平整坡面两种坡面处理, 探究横坡垄作对不同坡度坡耕地产流产沙特性及其携带的氮磷养分流失情况。结果表明: (1) 坡面坡度小于 20° 时, 横坡垄作能明显降低降雨过程中坡面的产流产沙量, 产流量和产沙量最大分别可降低 95% 和 99%; 而当坡度增大至 20° 时, 横坡垄作坡面发生断垄, 横坡垄作对径流和泥沙的控制效应随之减弱, 产流和产沙量会接近或大于平整坡面。(2) 横坡垄作对养分流失浓度的影响较小, 但对养分流失量具有明显影响。坡面坡度小于 20° 时, 横坡垄作具有较好的控制坡面养分流失量的效果; 当坡度增大至 20° 时, 横坡垄作控制养分流失的作用减弱。径流中全氮的流失量始终大于全磷的流失量; 除横坡垄作 10° 坡面外, 泥沙中全磷的流失量均大于全氮的流失量。(3) 坡面养分流失量主要由坡面径流量和泥沙量决定。径流养分流失率和产流速率、泥沙养分流失率和产沙速率满足线性正相关关系。横坡垄作对径流和泥沙中养分减少效益分别可以达到 45%~100%、59%~100%。整体上而言, 横坡垄作是控制坡面土壤侵蚀及减少养分流失的一种有效方法。

关键词: 横坡垄作; 坡度; 产流产沙; 养分流失

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Study on the Effects of Counter Tillage on Runoff and Sediment Yield and Process of Nitrogen and Phosphorus Nutrient Loss on Sloping Farmland

LU Shuning^{1,2}, LI Rongrong³, YAO Chong^{1,2}, WU Faqi^{1,3†}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Counter tillage is a common soil and water conservation tillage practice, which can influence the soil erosion process by increasing storage and infiltration capacity on sloping farmland. However, studies about the effects of counter tillage on nutrient losses during soil erosion processes on sloping farmland are still limited.

【Objective】 Therefore, this study aimed to reveal the characteristics of nutrient loss on sloping farmland.

【Method】 In this study, the rainfall simulation was conducted with a rainfall intensity of $90\text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, five slope gradients (3° , 5° , 10° , 15° , 20°) and two types of slope treatments (counter tillage and flat slope) on runoff plots with

* 国家自然科学基金项目 (41977065) 和国家重点实验室开放基金项目 (K3050219171) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41977065), and the Open Fund of State Key Laboratory (No.K3050219171).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wufaqi@263.net

作者简介: 陆淑宁 (1999—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 15698620077@163.com

收稿日期: 2023-05-04; 收到修改稿日期: 2023-09-15; 网络首发日期 (www.cnki.net):

<http://pedologica.issas.ac.cn>

projection length 4.5 m and projection width 1.5 m to explore the effects of counter tillage on the characteristics of soil erosion and nitrogen and phosphorus nutrient losses on sloping farmland of different slope gradient. 【Result】 The results showed that: (1) When the slope gradient was less than 20°, counter tillage significantly reduced the amount of runoff and sediment on the sloping farmland and the amount of runoff and sediment reduced by a maximum of 95% and 99% respectively. When the slope gradient increased to 20°, a break in the ridge occurred on the counter tillage and the control effect on the runoff and sediment was gradually weakened. Also, the amount of runoff and sediment was close to or greater than that of the flat slope. (2) The effect of counter tillage on the concentration of nutrient loss was small, but it had a significant effect on the nutrient losses. When the slope gradient was less than 20°, the counter tillage had a better effect on controlling the nutrient losses on the sloping farmland. However, when the slope gradient increased to 20°, the effect of counter tillage on controlling nutrient losses was weakened. Additionally, TN losses were always greater than TP losses in runoff; except for the 10° slope gradient on CT, while TP losses were greater than TN in sediment. (3) The nutrient losses were mainly determined by the amount of runoff and sediment, while the nutrient loss rate and runoff rate or sediment production rate satisfied a linear positive correlation. In addition, the reduction benefits of nutrient losses on counter tillage in runoff and sediment can reach 45% to 100% and 58% to 100%, respectively. 【Conclusion】 Our results show that counter tillage is an effective tillage practice to control soil erosion and nutrient losses.

Key words: Counter tillage; Slope gradient; Runoff and sediment yield; Nutrient loss

土壤侵蚀是制约黄土高原高质量发展最严重的生态环境问题之一^[1]。坡耕地是黄土高原主要的土地利用类型,占地面积高达 12.95 万 km²,由于常年采用传统犁耕为主的耕作措施使得土壤机械扰动频繁,从而导致表层土壤结构松散,使之成为该地区土壤侵蚀的主要来源。严重的土壤侵蚀不仅导致土地质量下降、洪涝灾害加剧等^[2],也会造成大量土壤养分随径流及泥沙迁移,使表土中的养分流失,造成水环境污染和水体恶化等问题^[3]。已有研究表明,选取合适的耕作方式,可通过改变微地形,提高土壤入渗性能,降低径流量,进而有效控制土壤侵蚀,改善土壤性状^[4-6],而不合理的耕作措施则会破坏土壤自然物理结构,使土壤团聚体破碎,加剧坡面水土流失^[7]。横坡垄作是在坡耕地上采用的一种集水蓄墒耕作技术,它通过改变坡面微地形有效拦截地表径流,增加土壤水分入渗率,从而减少坡面水土流失^[8],也会一定程度影响坡面养分的流失浓度、含量以及形态。迟宇博等^[9]通过研究横坡垄作对黄绵土坡面侵蚀及磷素流失的影响,得到横坡垄作能有效减少坡面泥沙磷素流失的结论;Xia 等^[10]通过进行田间试验研究横坡垄作对地表养分流失的影响,得到的结论表明横坡垄作方式下地表磷素流失量会显著减少,但氮素流失量变化不大;同时,也有研究发现横坡垄作会增加氮素流失浓度和氮素流失量^[11]。探究黄土坡耕地耕作措施对氮磷养分流失规律的影响,可以为黄土坡耕地地力提升和区域高质量发展提供更多科学参考。

除耕作措施外,坡度也是影响坡面土壤侵蚀、养分流失的重要因素之一。坡度通过改变重力沿坡面方向的分力,影响坡面径流流速、剪切力等进而影响侵蚀过程,最终对坡面养分迁移量产生影响。李光录等^[12]、白红英等^[13]通过大量的调查和试验,总结出坡度增大会使养分流失量增大的结论;但是刘秉正等^[14]指出,径流中的养分浓度及泥沙中的养分流失量均随坡度的增大而减小,但减小到一定值后,几乎保持不变;Sims 等^[15]和 Sharpley^[16]研究结果表明当坡度增大时,坡面径流流速加快,径流中养分流失能力下降但泥沙养分流失量增大。明晰坡耕地氮磷养分流失对坡度的响应特征,可以为坡耕地养分流失控制和土壤质量维护提供数据支持。

氮和磷是作物生长所必需的营养元素^[17],且黄土高原地区主要耕种土壤的氮磷养分十分贫瘠,通常采用大量投入氮肥和磷肥的方法来提高坡耕地土壤肥力,施用过量的化肥容易导致养分损失和水体富营养化^[18]。控制坡耕地土壤侵蚀及养分流失是提高土壤质量的基本举措,也是解决环境问题,保证粮食安全的重要内容。现有的研究由于所选用的土壤类型、坡度范围及降雨强度不同,研究结果存在差异性^[19-20]。本文以人工模拟降雨为条件,以坡面耕作措施和坡度为变量,探讨横坡垄作对坡耕地氮磷养分流失过程的影响,研究结果可为明确横坡垄作的水土保持效益及养分流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

研究区域位于陕西省咸阳市杨凌高新技术产业示范区（34° 14′ —34° 20′ N，107° 59′ —108° 08′ E）。该地主要气候为暖温带半湿润大陆性气候，年平均降水量 637.6 mm，年降水量的 60%集中于 7-10 月，年平均气温 12.9℃。壤土为该地区主要的土壤类型，是由当地森林褐土经长期耕作和施用土肥形成的一种农业耕作土壤。试验土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the test soil

土壤类型	颗粒组成			土壤含水量	土壤容重	有机碳	全氮	全磷	速效磷	铵态氮	硝态氮
	Particle composition/%			Soil moisture	Bulk	Organic	Total	Total	Available	NH ₄ ⁺ -N/(g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(g·kg ⁻¹)
	砂粒	粉粒	黏粒	content	density/(g·cm ⁻³)	carbon/(g·kg ⁻¹)	nitrogen/(g·kg ⁻¹)	phosphorus/(g·kg ⁻¹)	phosphorus/(g·kg ⁻¹)		
壤土 Lou soil	30.00	43.70	26.30	13.00	1.35	12.15	0.89	1.22	23.87	10.37	14.33

径流小区的投影长为 4.5 m，投影宽为 1.4 m，模拟降雨试验采用中国科学院水利部水土保持研究所生产的侧喷式降雨机。降雨机包括一个水箱、一个水泵、供水管、两个支架和两个侧面喷头，通过改变管道中的水压和喷头尺寸，可以调整降雨强度。降雨高度为 7.5 m，能确保雨滴滴落终速达到自然雨滴降落速度的 98%以上。

1.2 试验设计

根据中国科学院黄土高原综合科学考察队耕地坡度分级数据计算，黄土高原坡耕地（>3°）占耕地面积的 47.7%，其中，>7° 的占坡耕地总面积的 81.2%，>15° 的占 44.8%，>25° 的仅占 11.9%，因此，本文选取 3°、5°、10°、15°、20° 的径流小区，分别进行降雨。经长期野外监测，90 mm·h⁻¹ 雨强代表该地区典型侵蚀性降雨事件^[21]，因此本试验选取 90 mm·h⁻¹ 的降雨强度，降雨时间为 40 min，每场降雨的总降雨量为 60 mm。同时选择横坡垄作和平整坡面两种坡面处理措施。

（1）横坡垄作（CT）：使用农具耩在坡面上沿等高方向（耩是一种类似于犁的传统农具，用于准备小麦、高粱等作物的苗床，它是由一个 1.6~1.7 m 长的铁柄以及底部间隔约 14 cm 的两个“角”组成），垂直于坡面走向，进行横坡垄作，形成沟垄相间的地表形态，形成的垄高约为 6 cm，垄间距约为 14 cm（如图 1）。

（2）平整坡面（CK）：无耕作措施坡面，平整无任何地表高低起伏的状态。

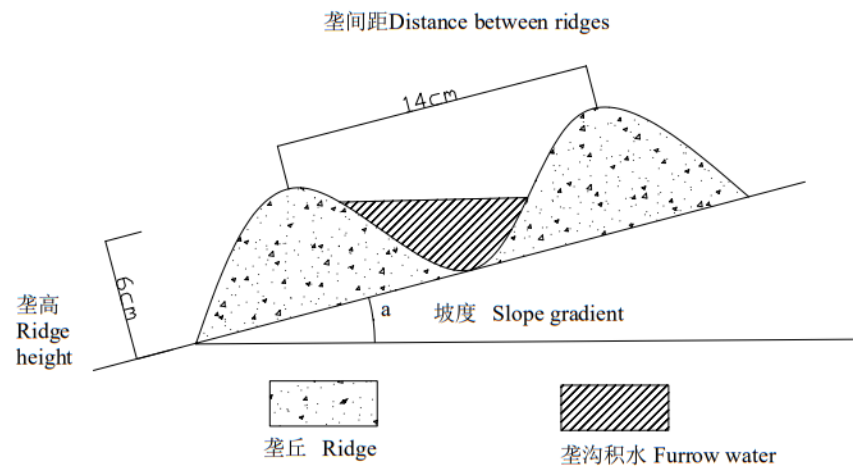


图 1 横坡垄作示意图

Fig.1 Schematic diagram of counter tillage

每场降雨前使用遮雨布遮盖小区，使用位于径流小区边缘的 9 个雨量杯测量每个测点实际降雨强度，以确保降雨强度达到 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，降雨均匀度大于 93%^[22]。待其稳定后，迅速揭开覆盖在小区上的遮雨布并开始计时，待坡面泥沙出流稳定后，记录坡面产流时间。坡面产流开始后，用塑料桶收集径流泥沙，间隔时间为 2 min，直至 40 min 时降雨结束（若存在 40 min 内坡面未产流的情况，则延长坡面降雨时间，直至坡面产流并记录坡面产流时间，但不对径流泥沙样品进行分析），降雨结束后坡面的径流泥沙样品继续用塑料桶进行收集，待径流小区出口处的水流由连续状态变为断续状态时，即为产流结束，每处理进行 1 次试验。对样品称重后静置 24 h，待样品沉淀完全后，取上层清液 500 mL 装于聚乙烯塑料瓶，置于 4℃ 冰箱保存，并在 48 h 内测定完毕。倒掉剩余的上层清液后将泥沙冲洗至铝盒中，放入烘箱，烘箱设置为 75℃，烘干至恒重后称重，并将烘干泥沙样品装于密封袋中保存，以便后续测试与分析。

1.3 样品分析

样品特性分析采用 CleverChem380 全自动间断化学分析仪，主要测定径流和泥沙中全磷（TP）、全氮（TN）含量。仪器测定过程中进样次数设置为 3~4 次，以避免系统误差，同时，在每批次样品的测定过程中随机间隔放置 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ （超纯水）和标准样品进行核准。其中，全磷采用磷钼蓝分光光度法测定，全氮采用水杨酸分光光度法测定。测定中以试验用水作为空白样，径流养分的最终结果应扣除试验用水的养分含量，每样品重复测定 3 次。

1.4 指标计算

坡面产流速率和产沙速率计算公式如下：

$$RR = \frac{R_t}{S_t} \quad (1)$$

$$SR = \frac{S_t}{S_t} \quad (2)$$

式中， RR 为坡面的产流速率 ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$)， R_t 为接样时间内收集的径流量 (L)， S 为径流小区面积 (m^2)， SR 为坡面的产沙速率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)， S_t 为接样时间内收集的泥沙量 (kg)， t 为采样间隔时间。

横坡垄作的减流效益和减沙效益计算公式如下：

$$B_r = \frac{R_{CK} - R_{CT}}{R_{CK}} \times 100\% \quad (3)$$

$$B_s = \frac{S_{CK} - S_{CT}}{S_{CK}} \times 100\% \quad (4)$$

式中， B_r 为横坡垄作的减流效益， R_{CK} 为平整坡面的径流量 (L)， R_{CT} 为横坡垄作坡面的径流量 (L)， B_s 为横坡垄作的减沙效益， S_{CK} 为平整坡面的泥沙质量 (g)， S_{CT} 为横坡垄作坡面的泥沙质量 (g)。

径流和泥沙中的养分平均流失浓度计算公式^[23]如下：

$$C_a = \frac{\sum C_i V_i}{\sum V_i} \quad (5)$$

$$C_a = \frac{\sum C_i W_i}{\sum W_i} \quad (6)$$

式中， C_a 为径流或泥沙中的养分平均流失浓度， C_i 为第 i 个样品中径流或泥沙携带的 TP、TN 的浓度或含量； V_i 为第 i 个径流样品体积 (L)； W_i 为第 i 个泥沙样品质量 (g)； $i=1 \sim n$ (n 为每场降雨样品数)。

基于全自动间断化学分析仪的测定结果，径流和泥沙中的养分流失量计算公式^[24]如下：

$$Q = \sum C_i V_i \quad (7)$$

$$Q = \sum C_i W_i \quad (8)$$

式中， Q 为径流或泥沙中的养分流失量 (mg)。

横坡垄作减少养分流失效益计算公式如下：

$$B_n = \frac{Q_{CK} - Q_{CT}}{Q_{CK}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, B_n 为横坡垄作减少养分流失的效益, Q_{CK} 为平整坡面的养分流失量 (mg), Q_{CT} 为横坡垄作坡面的养分流失量 (mg)。

径流和泥沙中的养分流失速率计算公式如下:

$$V = QS^{-1}t^{-1} \quad (10)$$

式中, V 为径流或泥沙中的养分流失速率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), S 为径流小区面积 (m^2)。

1.5 数据处理

采用 Excel 及 SPSS20.0 软件进行数据处理与分析, 主要包括基本指标描述、Pearson 相关分析等; 采用 Origin2021b 进行试验结果相关图的绘制。

2 结果

2.1 横坡垄作对不同坡度坡面产流产沙的影响

图 2、图 3 分别为不同坡度下横坡垄作和平整坡面产流量和产沙量的变化过程。可以看出, 在降雨初期, 产流量和产沙量急剧增大, 随着降雨过程的进行, 产流量和产沙量逐渐趋于稳定。坡面产流量和产沙量均随坡度的增大而增大, 平整坡面, 20° 时的产流量和产沙量最大可以达到 3° 坡面的 23.61 倍和 143.33 倍。横坡垄作影响坡面的产流和产沙量, 当坡面坡度小于 20° 时 (3° 、 5° 、 10° 、 15°), 横坡垄作的产流量和产沙量始终低于平整坡面, 在 3° 、 5° 、 10° 、 15° 坡面, 同一时刻, 横坡垄作最大可将产流量分别减少 12.14、14.94、16.58、115.91 L, 最大可将产沙量分别减少 67.59、281.22、390.86、747.57 g。当坡面坡度增大至 20° 时, 横坡垄作坡面中部发生断垄, 产流量和产沙量存在以时间为界的突变, 垄体在被冲垮之前, 产流量和产沙量逐渐增大, 却始终低于平整坡面, 坡面在降雨后 18 min 左右发生断垄, 断垄前一时刻的产流量和产沙量分别为 13.91 L 和 718.09 g; 断垄发生后, 坡面产流量和产沙量急剧增大, 并在 20 min 左右出现第一个峰值, 此时横坡垄作坡面的产流量和产沙量分别为 24.72 L 和 1771.85 g, 分别为平整坡面的 1.55 倍、1.80 倍; 此后产流和产沙量急剧下降, 并在 32 min 左右出现第二个峰值, 此时横坡垄作的产流量稍大于平整坡面的产流量, 而产沙量小于平整坡面。

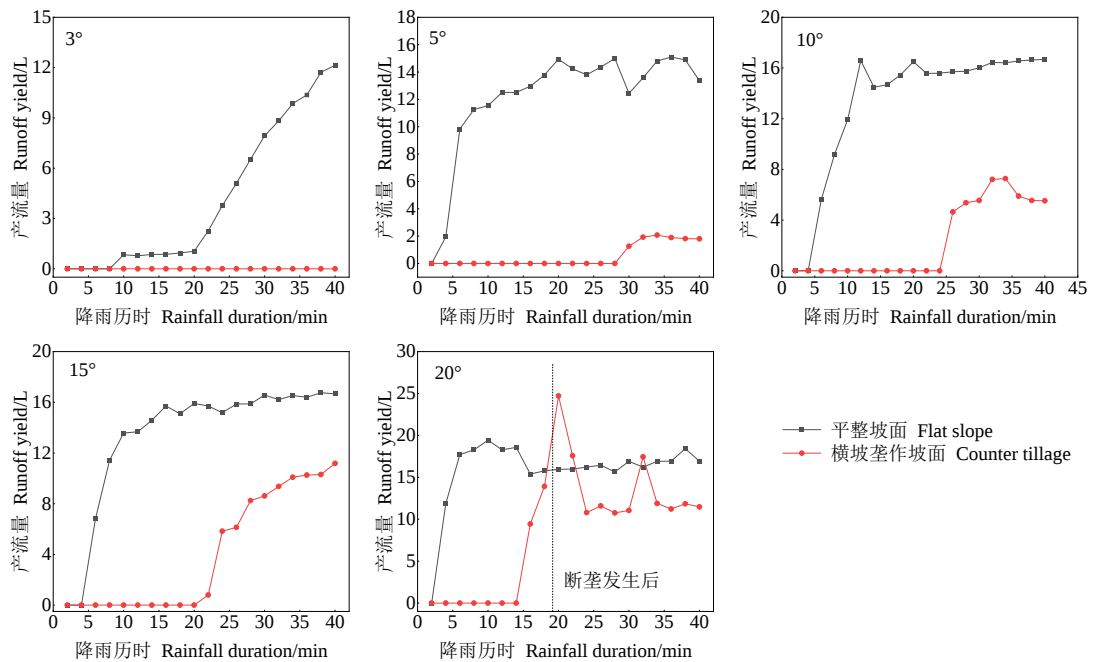


图 2 横坡垄作和平整坡面产流变化过程

Fig.2 Variation of runoff yield under counter tillage and flat slope

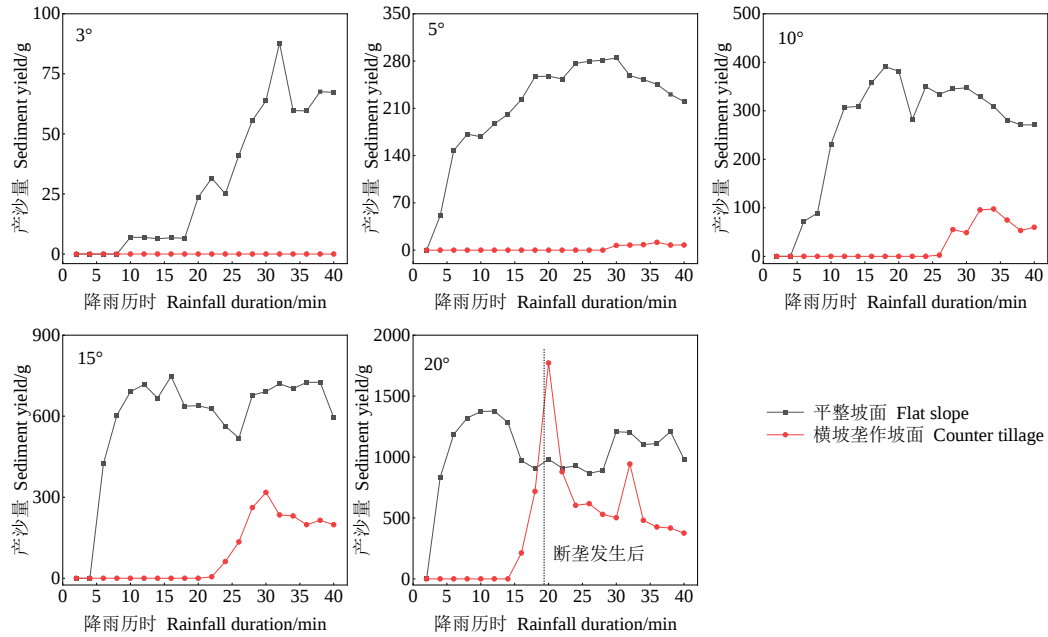


图3 横坡垄作和平整坡面产沙变化过程

Fig.3 Variation of sediment yield under counter tillage and flat slope

对不同坡度下横坡垄作和平整坡面的产流时间、降雨初损量、径流总量、泥沙总量进行对比分析, 结果如表 2 所示。整体来看, 坡面产流时间和降雨初损量随坡度的增大而减小, 平整坡面, 坡度为 20° 时的产流时间较 3° 时提前了 6.70 min, 降雨初损量为 3° 时的 31.84%; 横坡垄作坡面, 坡度为 20° 时的初始产流时间较 3° 时提前了 27.05 min, 降雨初损量为 3° 时的 32.54%。坡面径流总量和泥沙总量随坡度的增大而增大, 平整坡面, 20° 时的径流总量和泥沙总量分别为 3° 时的 3.79 倍和 33.48 倍。横坡垄作能延缓坡面初始产流时间, 在不同坡度坡面, 坡面初始产流时间延迟了 11.58~31.91 min, 坡度越小, 横坡垄作对坡面产流时间的延长作用越明显。横坡垄作可以减少坡面产流产沙量, 3°、5°、10°、15°、20° 坡面下的减流效益与减沙效益分别为: 100%、95.56%、82.31%、69.90%、45.35%与 100%、98.51%、90.73%、84.09%、58.92%。5 个坡度下的减流效益大小、减沙效益大小均随坡度的增大而减小。在产流产沙情况下, 减沙效益始终大于减流效益。

表 2 横坡垄作和平整坡面产流时间、降雨初损量、径流总量、泥沙总量变化特征

Table2 Variation of the initial runoff producing time, initial runoff loss, total amount of runoff and sediment under counter tillage and flat slope

类型	坡度	产流时间	降雨初损量	径流总量	泥沙总量
Type	Slope gradient/°	Runoff time/min	Initial rainfall loss /mm	Total amount of runoff/(L·m ⁻²)	Total amount of sediment/(g·m ⁻²)
平整坡面	3	9.83	14.75	11.18	82.19
CK	5	3.03	4.55	32.38	566.30
	10	4.08	6.13	35.44	701.10
	15	4.05	6.08	35.81	1557.00
	20	3.13	4.70	42.38	2152.00
横坡垄作	3	41.7	62.65	0.00	0.00
CT	5	29.68	44.53	1.44	6.51
	10	25.10	37.65	6.27	65.02
	15	21.45	32.18	10.78	247.70
	20	14.72	22.08	23.16	1130.00

2.2 横坡垄作对不同坡度坡面径流养分流失的影响

分析不同坡度下，横坡垄作和平整坡面径流中 TP、TN 的流失质量，结果如图 4 所示。可以看出，在降雨初期，各养分流失量随产流时间急剧增大，随着降雨历时的进行，逐渐趋于稳定。各养分流失量随坡度的增加而增大，平整坡面，20° 时的 TP、TN 流失量最大分别可以达到 3° 坡面的 40.88 倍、42.56 倍；横坡垄作坡面，20° 时的 TP、TN 流失量最大分别可以达到 5° 坡面的 11.54 倍、12.26 倍（3° 坡面未产流）。当坡面坡度小于 20° 时（3°、5°、10°、15°），横坡垄作处理的养分流失量均小于平整坡面的养分流失量；当坡面坡度增大至 20° 时，横坡垄作坡面发生断垄，断垄发生瞬间，横坡垄作的养分流失量急剧增大，在 20 min 左右达到整个降雨历时的第一个峰值，此时横坡垄作坡面的 TP、TN 流失量为 186.22、235.41 mg，分别为平整坡面的 1.65 倍、1.54 倍，断垄发生后，横坡垄作坡面的养分流失量逐渐降低，在 32 min 左右，由于坡面又一垄体被冲垮，坡面产流量较大，此时的 TP、TN 流失量达到降雨历时的第二个峰值，稍大于平整坡面的流失量。

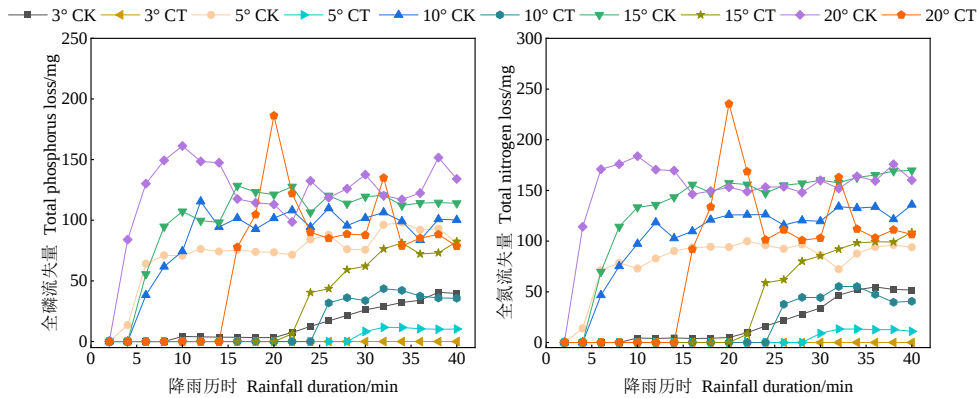


图 4 横坡垄作和平整坡面径流养分流失量变化过程

Fig.4 Variation of nutrient losses in runoff under counter tillage and flat slope

为揭示横坡垄作和坡度对坡耕地养分流失浓度的影响，对不同耕作措施和坡度下的 TP、TN 平均流失浓度进行分析比较，结果如表 3 所示。可以看出，坡度影响养分的平均流失浓度，TP 的平均流失浓度随坡度的增大而增大，在 20° 坡面达到最大值，此时平整坡面和横坡垄作处理下分别为 7.63、7.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；TN 的流失浓度先随坡度的增大而增大，并在 15° 时达到最大值，此时平整坡面和横坡垄作处理下分别为 9.89、9.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，之后 TN 平均流失浓度随坡度的增大而减小。在坡度相同时，平整坡面和横坡垄作处理间的养分流失浓度整体上差异不明显。

表 3 径流养分平均流失浓度变化情况

Table 3 The mean concentrations of nutrient loss in runoff

类型 Type	坡度 Slope gradient/ $^{\circ}$	全磷平均流失浓度 The mean concentrations of TP		全氮平均流失浓度 The mean concentrations of TN	
		loss/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		loss/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	
平整坡面 CK	3	3.360		4.694	
	5	5.968		6.617	
	10	6.324		7.763	
	15	7.416		9.892	
	20	7.629		9.464	
横坡垄作 CT	3	0.000		0.000	
	5	5.792		6.681	
	10	6.305		7.758	
	15	7.386		9.798	
	20	7.531		9.452	

3.3 横坡垄作对不同坡度坡面泥沙养分流失的影响

图 5 揭示了泥沙中的 TP、TN 流失量变化特征。不同处理下，TP、TN 流失量总体随产流时间延长波动变化。泥沙中各养分流失量随坡度的增大而增大，20° 坡面，平整坡面 TP、TN 的输出量分别在 118.12~212.90 mg、120.81~193.65 mg 之间；横坡垄作坡面，TP、TN 输出量分别在 33.61~264.58 mg、31.62~257.33 mg 之间。当坡面坡度小于 20° 时（3°、5°、10°、15°），横坡垄作处理的泥沙养分流失量小于平整坡面；当坡面坡度增大至 20° 时，横坡垄作坡面发生断垄，断垄发生时，横坡垄作坡面的产沙量急剧增大并超过平整坡面，导致横坡垄作泥沙中养分的流失量随之增大，并在 20 min 左右到达峰值，此时 TP、TN 的流失量分别达到 264.58 mg、257.33 mg。

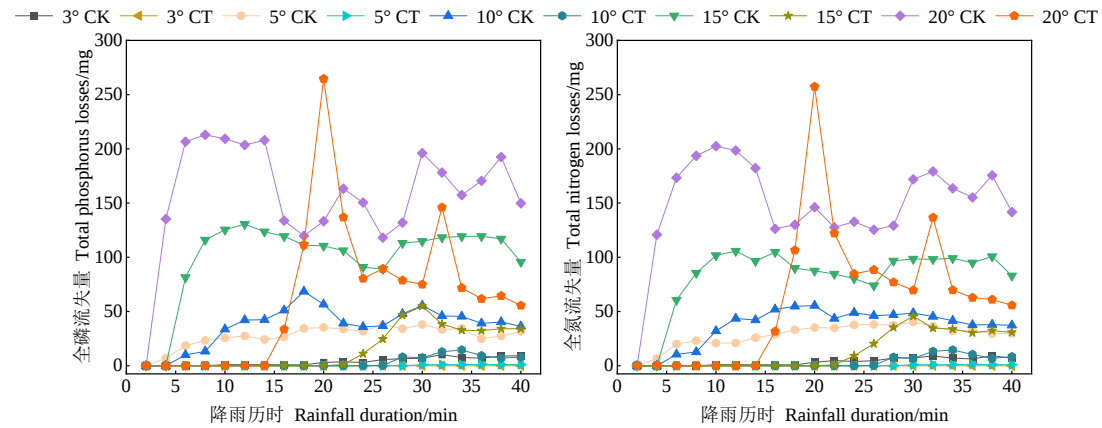


图 5 横坡垄作和平整坡面泥沙养分流失量变化过程

Fig.5 Variation of nutrient losses in sediment under counter tillage and flat slope

表 4 揭示了不同耕作措施和坡度下泥沙 TP、TN 流失浓度变化。整体来看，泥沙 TP、TN 平均流失浓度受坡度的影响，TP 平均流失浓度先随坡度的增大而增大，在 15° 坡面达到峰值，此后随坡度的增大而减小；平整坡面下，TN 平均流失浓度随坡度的增大而增大，但横坡垄作坡面，TN 平均流失浓度先随坡度的增大而增大，峰值出现在 15°，此时的 TN 流失浓度为 0.15 mg·g⁻¹，此后随着坡度的增大，TN 的平均流失浓度减小。相同坡度下两种耕作措施泥沙养分平均流失浓度差异不明显。

表 4 泥沙养分平均流失浓度变化情况

Table 4 The mean concentrations of nutrient loss in sediment

类型 Type	坡度 Slope gradient/°	全磷平均流失浓度	全氮平均流失浓度
		The mean concentrations of TP	The mean concentrations of TN
		loss/(mg·g ⁻¹)	loss/(mg·g ⁻¹)
平整坡面 CK	3	0.124	0.120
	5	0.130	0.133
	10	0.141	0.140
	15	0.171	0.141
	20	0.154	0.144
横坡垄作 CT	3	0.000	0.000
	5	0.133	0.130
	10	0.139	0.140
	15	0.167	0.147
	20	0.150	0.144

3.4 横坡垄作控制养分流失效益

表 5 是根据各坡度条件下，横坡垄作和平整坡面径流和泥沙中养分流失总量情况统计而成。可以看出，平整坡面，对于 TP 的流失，泥沙携带和径流携带在不同坡度下起到不同的主导作用，而 TN 的流失始终以

径流携带为主；横坡垄作坡面，TP、TN 的流失均以径流携带为主。基于此，利用相关公式计算出不同坡度条件下，横坡垄作减少径流和泥沙中 TP、TN 的效益，如图 6 所示。可以看出，在不同坡度下，横坡垄作均能明显减少养分流失，且随着坡度的增大，横坡垄作减少养分流失的效益逐渐减小。相同坡度条件下，横坡垄作对泥沙中养分的减少效益始终大于对径流中养分的减少效益。在 3° 坡面，横坡垄作减小养分流失的效益能达到 100%，这是由于本试验中横坡垄作 3° 坡面并未产流，但在实际生产实践中，由于自然环境和人为因素等的制约，往往很难达到 100%。

表 5 养分流失总量变化情况

Table 5 The total nutrient losses in runoff									
全磷流失量 Total phosphorus losses/mg						全氮流失量 Total nitrogen losses/mg			
类型 Type	坡度 Slope gradient/ °	泥沙携 带		径流携带		径流携 带		Q _S /Q _R	总流失量 Total losses
		Total losses in sediment/ Q _S	Total losses in runoff/Q _R	Total losses in sediment/Q _S	Total losses in runoff/ Q _R	Q _S /Q _R	总流失量 Total losses		
平整	3	76	282	0.270	358	74	393	0.187	467
坡面	5	550	1449	0.380	1999	563	1607	0.351	2170
CK	10	740	1681	0.440	2421	737	2063	0.357	2800
	15	1994	1992	1.001	3986	1642	2656	0.618	4299
	20	3170	2425	1.307	5595	2975	3008	0.989	5984
横坡	3	0	0	0.000	0	0	0	0.000	0
垄作	5	6	62	0.104	69	6	72	0.088	78
CT	10	68	296	0.228	364	68	365	0.187	433
	15	310	597	0.520	907	273	792	0.345	1065
	20	1270	1308	0.971	2578	1223	1642	0.745	2865

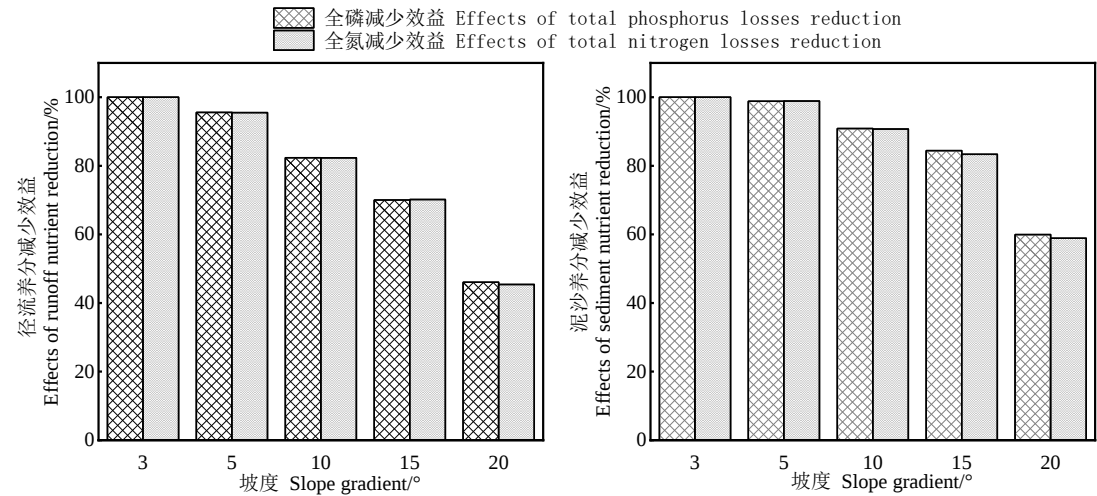


图 6 横坡垄作减少养分流失效益
Fig.6 Nutrient reduction benefits under counter tillage

3 讨 论

3.1 横坡垄作对不同坡度坡耕地产流产沙的影响

降雨和径流冲刷是土壤侵蚀和养分流失的主要动力^[25], 坡度影响坡面的产流产沙过程。坡度增加会使雨滴降落坡面的垂直分力减小, 沿坡面的分力增大, 径流沿坡面运动速度随之加快, 坡面产流时间越早, 这与陈正发等^[26]、方乾等^[27]、Zhang 等^[28]的结论一致。本文中, 10°、15° 坡面的初始产流时间较 5° 坡面迟, 这可能是由于在相同坡长条件下, 随着坡度的增加, 有效降雨面积减少, 其产生的效果与增大坡度的效果相互抵消一部分。随着坡度的增大, 坡面细沟侵蚀加剧, 细沟流量和流速均增加^[29-30]。雨水在坡面停留时间因此缩短, 降雨入渗量随之变小, 导致坡面径流量增大。在坡面流速和坡面径流量的共同作用下, 径流对土壤颗粒的分散作用及冲刷搬运能力增强^[31], 所以坡面产沙量随坡度的增加逐渐增大。

横坡垄作增加了坡面微地形的起伏, 起到拦截径流、增加土壤水分入渗的作用, 且横坡垄作形成的沟垄深度、容积均较大, 具有较强的蓄水作用, 待沟垄蓄满雨水之后才开始产流, 因此相同坡度条件下, 横坡垄作的初始产流时间始终晚于平整坡面。横坡垄作处理的坡面在未发生断垄时, 坡面产流量和产沙量始终低于平整坡面, 因为横坡垄作形成的垄体能够拦截降雨, 使得雨水在垄内汇集^[32]。横坡垄作会增加地表糙度, 使地表微地形起伏增大, 坡面泥沙沉积量增加, 坡面泥沙损失量随之减小^[33]。随着坡度增大, 坡面产流速率和产流量增加, 一旦垄内的积水超过垄丘的拦蓄能力, 垄丘下坡在上方来水的冲刷和渗流作用下形成细沟沟头, 坡面细沟侵蚀随之加剧, 当垄丘剩余土体土壤颗粒间的黏结力小于土体自身的重力和径流剪切力时, 坡面发生断垄^[34]。断垄发生后, 沟垄内蓄积的雨水和垄体本身成为坡面土壤侵蚀的主要水沙来源, 坡面产流产沙量急剧增大甚至会超过平整坡面。

3.2 横坡垄作对不同坡度坡耕地养分流失的影响

坡度对坡耕地养分流失有重要影响。改变坡面坡度即改变土壤表层受到的雨滴击溅力以及径流对坡面的冲刷作用, 最终会影响到坡面水流特征及径流与侵蚀泥沙中各养分的含量^[35]。在本研究中, 径流与泥沙中 TP、TN 流失浓度随坡度变化不明显, 但流失量随坡度的增大而增加, 这是由于随着坡度增大, 坡面产流速率增大, 快速冲刷土壤表层并持续侵蚀下层土壤, 导致养分流失量增大。大量研究表明^[36-37], 坡面养分流失量并不随着坡度的增大而持续增加, 而是存在一个临界坡度, 由于试验方法和土壤性质的不同, 临界坡度会存在一定的差异。本试验并未出现临界坡度, 可能在 20° 以上, 还需要进一步研究。横坡垄作对土壤养分流失的影响主要表现在两个方面: 一是由于耕作会对土壤进行扰动, 导致不同的土壤环境, 影响土壤养分的贮藏与流失; 二是由于耕作措施对水土流失的影响不同, 导致径流和泥沙对土壤养分的再分配和土地生产力产生不同的影响^[38]。横坡垄作处理的坡面养分流失浓度和平整坡面差异不显著, 其流失量主要受径流和泥沙总量的影响^[39], 径流和泥沙中的养分流失量和土壤流失呈现显著的正相关关系^[40]。在坡度较小时, 横坡垄作坡面未产生断垄但改变了微地形, 增大了地表糙度, 导致径流在垄处汇集, 延缓了土壤侵蚀产流产沙的过程, 减少了水土流失, 坡面养分流失量随之减小; 而坡度较大时, 坡面发生断垄, 产流与产沙速率急剧增大, 对坡面的冲刷作用随之增大, 坡面养分流失量因此超过平整坡面。径流和泥沙中养分流失速率分别与产流和产沙速率存在显著的正相关关系(表 6), R^2 范围为 0.907 至 0.999。径流中 TP、TN 随产流速率变化的回归系数大小分别为 460.70、557.43, 这表明径流中两种养分流失浓度的大小关系为: $TN > TP$; 而泥沙中 TP、TN 随产沙速率变化的回归系数分别为 157.46、144.75, 表明泥沙中两种养分流失浓度的大小关系为: $TP > TN$ 。径流中全氮的流失量始终大于全磷的流失量, 这说明与磷素相比, 氮素更容易被水体溶解和携带^[41-42]。除横坡垄作 10° 坡面外, 泥沙中全磷的流失量均大于全氮的流失量, 这是由于磷素吸附性较强, 主要随泥沙流失^[43]。

表 6 养分流失速率和产流产沙速率的拟合关系

Table 6 Relationship between nutrient loss rate and runoff or sediment generation rate

	径流中的养分 Nutrient in runoff		泥沙中的养分 Nutrient in sediment	
	回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
平整坡面 TP	$y=460.70x-51.80$	0.907	$y=157.46x-6.57$	0.992
横坡垄作 TN	$y=557.43x-39.53$	0.940	$y=144.75x-4.819$	0.999

横坡垄作控制养分流失的效益随着坡度的增大而减小，这是由于坡度的增加会导致横坡垄作控制径流和泥沙的作用降低。坡面土体的不稳定性与坡度成正比，陡坡上的垄体要分出较低坡度更多的力来平衡自身重力，导致垄体易于失稳垮塌发生位移^[44]，且垄体被冲垮后，细沟末端发生侵蚀过程，细沟流携带大量泥沙流失^[45]。但横坡垄作在不同坡度下控制养分流失的效益均为正值，因此，无论垄体是否被破坏，横坡垄作仍然是控制坡面土壤侵蚀及养分流失的一种实用方法。

4 结 论

本文通过人工模拟降雨试验，探究了横坡垄作对坡耕地氮磷养分流失过程的影响。结果表明：（1）坡度越大，坡面产流时间越早。横坡垄作能明显延缓坡面初始产流时间，不同坡度条件下，坡面初始产流时间延迟了 11.58~31.93 min，坡面坡度越小，延迟作用越明显。当坡面坡度小于 20° 时（3°、5°、10°、15°），横坡垄作能明显减小坡面产流产沙量；当坡面坡度增大至 20° 时，横坡垄作坡面会发生断垄，产流产沙量随之增大，会接近或大于平整坡面。（2）横坡垄作和坡度对氮磷养分流失浓度的影响较小，但对养分流失量具有较大影响。坡度较小时，横坡垄作能明显减少径流与泥沙中氮磷养分的流失量；随着坡度增大，由于横坡垄作坡面发生断垄，横坡垄作控制养分流失的效果减弱。径流中全氮的流失量始终大于全磷的流失量，除横坡垄作 10° 坡面外，泥沙中全磷的流失量均大于全氮的流失量。（3）产流速率与径流养分流失速率、产沙速率与泥沙养分流失速率均呈现线性正相关关系。（4）横坡垄作在不同坡度均具有较好的控制养分流失的效益，横坡垄作对泥沙中养分的控制效益大于对径流中养分的控制效益。

参考文献（References）

- [1] Wu L, Liu X, Ma X Y. Application of a modified distributed-dynamic erosion and sediment yield model in a typical watershed of a hilly and gully region, Chinese Loess Plateau[J]. Solid Earth, 2016, 7(6): 1577-1590.
- [2] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 1-11.
- [3] Zeng S D, Zhan C S, Sun F B, et al. Effects of climate change and human activities on surface runoff in the Luan River Basin[J]. Advances in Meteorology, 2015, 1-12.
- [4] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 34-40.
- [5] Li Z W, Liu C, Dong Y T, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 1-9.
- [6] Peng Q, Liu B Y, Hu Y X, et al. The role of conventional tillage in agricultural soil erosion[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 348: 108407.
- [7] Yang S Q, Han R Y, Xing L, et al. Effect of slope farmland soil and water and soil nitrogen and phosphorus loss

based on different crop and straw applications and ridge patterns in the basin of the main stream of the Songhua River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 42-47.

[8] Arnhold S, Ruidisch M, Bartsch S, et al. Simulation of runoff patterns and soil erosion on mountainous farmland with and without plastic-covered ridge-furrow cultivation in South Korea[J]. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(2): 667-679.

[9] Chi Y B, Wu L, Li R, et al. Characteristics of soil erosion and phosphorus loss from loessial sloping land under different measures during heavy rainstorms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2833-2843.

[迟宇博, 吴磊, 李蕊, 等. 不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(12): 2833-2843.]

[10] 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.

[11] Cherobim V F, Huang C H, Favaretto N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: Effects on runoff, sediment and nutrients losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 96-103.

[12] Li G L, Zhao X G, Wu F Q, et al. The effects of soil and water loss on soil nutrients[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1995, 10(S1): 28-33. [李光录, 赵晓光, 吴发启, 等. 水土流失对土壤养分的影响研究[J]. *西北林学院学报*, 1995, 10(S1): 28-33.]

[13] Bai H Y, Tang K L, Chen W L, et al. Studies on the process of soil erosion and nutrient loss in the sloping lands[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11(3): 14-19. [白红英, 唐克丽, 陈文亮, 等. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J]. *水土保持通报*, 1991, 11(3): 14-19.]

[14] Liu B Z, Li G L, Wu F Q, et al. The regular patterns of the loss of soil nutrients on southern Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(2): 77-86. [刘秉正, 李光录, 吴发启, 等. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. *水土保持学报*, 1995, 9(2): 77-86.]

[15] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2): 277-293.

[16] Sharpley A N. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1980, 9(3): 521-526.

[17] Fang H Y. Effect of soil conservation measures and slope on runoff, soil, TN, and TP losses from cultivated lands in Northern China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 126(6): 107677.

[18] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Nitrification and acidification from urea application in red soil (Ferralic Cambisol) after different long-term fertilization treatments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(9): 1526-1536.

[19] Cheng P, Liao C L, Xiao Q L, et al. Effects of cross slope ridge cultivation and straw mulching on nitrogen and phosphorus loss in red soil slope farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 1036-1046. [程鹏, 廖超林, 肖其亮, 等. 横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(5): 1036-1046.]

[20] Guo S F, Zhai L M, Liu J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 48-56.

[21] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 147-156.

[22] Zhang H H, Zhang H, Dong Y, et al. Characterization of runoff and sediment yield in farmlands on loess slopes based on R/S and wavelet analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1345-1356. [张慧荟, 章慧, 董艳, 等. 基于重标极差(R/S)和小波分析的黄土坡耕地产流产沙特征研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1345-1356.]

- [23] Yan L, Xue L H, Petropoulos E, et al. Nutrient loss by runoff from rice-wheat rotation during the wheat season is dictated by rainfall duration[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117382.
- [24] Girmay G, Singh B R, Nyssen J, et al. Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1/2): 70-80.
- [25] Wang S B, Song Y L, Wang K Q, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13): 160-169. [王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 160-169.]
- [26] Chen Z F, Li J, Duan Q S, et al. Evaluation of soil erosion and nutrient loss of slope farmland in Yunnan Province using USLE model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(16):124-134.[陈正发, 李靖, 段青松, 等. 基于 USLE 模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(16):124-134.]
- [27] Fang Q, Zhao L S, Fan C H, et al. Influencing factors of rainwater transformation and soil erosion in thin soil hillslope of rock desertification regions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8):88-97. [方乾, 赵龙山, 樊春华, 等. 石漠化区薄土层坡地雨水转化及土壤侵蚀影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8):88-97.]
- [28] Zhang F B, Yang M Y, Li B B, et al. Effects of slope gradient on hydro-erosional processes on an aeolian sand-covered loess slope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 447-456.
- [29] Zhang X Q, Hu M C, Guo X Y, et al. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China[J]. *Catena*, 2018, 160: 394-402.
- [30] Zhang X N, Feng J, Gao Y B, et al. [Effect of slope on runoff concentration and solute transport on slope land under different rainfall intensities](#)[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 119-123. [张小娜, 冯杰, 高永波, 等. 不同雨强条件下坡度对坡地产汇流及溶质运移的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 119-123.]
- [31] Zhang G H, Hu J J. Review on the influence factors of soil detachment process by overland flow and its mechanism[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(2):294-304. [张冠华, 胡甲均. 径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30(2):294-304.]
- [32] Wang L, He C, Zheng F L, et al. Soil-Bin experiment on effects of contour ridge tillage for controlling hillslope soil erosion in black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15):141-148. [王磊, 何超, 郑粉莉, 等. 黑土区坡耕地横坡垄作措施防治土壤侵蚀的土槽试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15):141-148.]
- [33] Locke M A, Krutz L J, Steinriede Jr R W, et al. Conservation management improves runoff water quality: Implications for environmental sustainability in a glyphosate-resistant cotton production system[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(2): 660-671.
- [34] Shen H O, Wen L L, Wu J L, et al. Review on the effects of ridge pattern and ridge-furrow intervals on soil erosion of sloping farmland in the black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(22):52-62. [沈海鸥, 温磊磊, 武佳龙, 等. 垄作与垄向区田技术对黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(22):52-62.]
- [35] Wallace C B, Burton M G, Hefner S G, et al. Effect of preceding rainfall on sediment, nutrients, and bacteria in runoff from biosolids and mineral fertilizer applied to a hayfield in a mountainous region[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 130: 113-118.
- [36] Wang L, Wang L, Wang Q J. The processes of nitrogen and phosphorus loss and migration in slope cropland under different slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):69-75. [王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2):69-75.]

- [37] Shao F F, Wu J H, Li Y C. Establishment and validation of the model for prediction of nutrient loss with runoff on bare slopes in the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4):900-910. [邵凡凡, 吴军虎, 李玉晨. 黄土区裸露坡地径流养分流失模型的建立与验证[J]. *土壤学报*, 2021, 58(4):900-910.]
- [38] Lei J Y, Lei X T, Zhou L N, et al. Effects of tillage measures on soil nutrients distribution and fertilizer use efficiency on gentle slope farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(18): 127-134. [雷金银, 雷晓婷, 周丽娜, 等. 耕作措施对缓坡耕地土壤养分分布及肥料利用率的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 127-134.]
- [39] Teixeira P C, Misra R K. Measurement and prediction of nitrogen loss by simulated erosion events on cultivated forest soils of contrasting structure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(2): 204-217.
- [40] Ao C, Yang P L, Zeng W Z, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing[J]. *Geoderma*, 2019, 353: 372-381.
- [41] Sutton M A, Howard C M, Erisman J W, et al. The European nitrogen assessment: Sources, effects and policy perspectives[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2011.
- [42] Liu R M, Wang J W, Shi J H, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469: 1069-1077.
- [43] Gao R X, Dai Q H, Gan Y X, et al. Characteristics of nutrient loss from sloping farmland in Karst region as a function of rainfall intensity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5):1072-1084. [高儒学, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 不同雨强下喀斯特坡耕地养分流失特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5):1072-1084.]
- [44] Liu M X, Wang J G, Yan P, et al. Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 90(1/2): 242-249.
- [45] Luo J, Zheng Z C, Li T X, et al. Spatial heterogeneity of microtopography and its influence on the flow convergence of slopes under different rainfall patterns[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 545: 88-99.

(责任编辑: 檀满枝)