

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.015

吴光琴,戴全厚,王勇,等.喀斯特玉米坡耕地产流产沙对坡度的响[J].水土保持学报,2024,38(6):13-22.

WU Guangqin, DAI Quanhou, WANG Yong, et al. Response of runoff and sediment yield from maize slope farmland in karst areas to slope gradient[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(6):13-22.

喀斯特玉米坡耕地产流产沙对坡度的响应

吴光琴^{1,2}, 戴全厚^{1,2}, 王勇^{1,2}, 丁鹏玮³, 姚一文^{1,2}

(1.贵州大学林学院,贵阳 550025;2.贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心,贵阳 550025;

3.上海勘测设计研究院有限公司,上海 200050)

摘要: [目的] 为揭示喀斯特地区玉米坡耕地地表、壤中、地下3种独特的水文路径对坡度的响应。[方法] 以贵州省喀斯特玉米坡耕地为研究对象,采用人工模拟降雨试验方法,在相同降雨强度(60 mm/h)条件下,不同坡度(5°,10°,15°,20°,25°)对各水文路径产流产沙规律的影响。[结果] (1)地表产流产沙与坡度呈极显著正相关($p < 0.01$),地表最大产流模数和最大输沙模数分别为 0.18 L/(min·m²)、13.12 g/(min·m²),地表产沙在 10~30 min 由面蚀演变为细沟侵蚀。(2)壤中流在中等坡度(15°)时径流系数最大(49%),可能导致土体稳定性降低,与此同时壤中产流、产沙量与坡度均呈极显著正相关($p < 0.01$)。虽然地下产流、产沙与坡度关系不显著,但地下产流占比受坡度影响最大。(3)地表产沙总量均大于壤中和地下产沙总量,3种不同水文路径(地表、壤中、地下)与坡度的拟合关系为地表径流>壤中径流>地下径流。[结论] 在喀斯特地区的玉米坡耕地中,随着坡度的增加,不同土层的水土流失规律表现出不一致性,且水土流失形式主要以地表侵蚀为主、地下漏失为辅,玉米冠层能在低坡度时减缓地表土壤侵蚀形式的演变。研究结果可为喀斯特玉米坡耕地水土流失估算及玉米种植策略等提供理论参考依据。

关键词: 玉米坡耕地; 不同坡度; 人工模拟降雨; 产流产沙; 喀斯特

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242-(2024)06-0013-10

Response of Runoff and Sediment Yield from Maize Slope Farmland in Karst Areas to Slope Gradient

WU Guangqin^{1,2}, DAI Quanhou^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, DING Pengwei³, YAO Yiwen^{1,2}

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Research Center of Soil Erosion and Ecological Restoration, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Shanghai Survey & Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200050, China)

Abstract: [Objective] To elucidate the responses of surface runoff, subsurface runoff, and underground runoff hydrological pathways to slope in maize sloping farmland in Karst regions. [Methods] Taking the karst maize slope in Guizhou Province as the research object, the artificial simulated rainfall test method was used to investigate the effects of different slopes (5°, 10°, 15°, 20°, 25°) on the runoff and sediment yield patterns of various hydrological pathways under the same rainfall intensity (60 mm/h). [Results] (1) Surface runoff and sediment yield showed a very significant positive correlation with slope gradient at the level of 0.01 ($p < 0.01$). The maximum runoff modulus and maximum sediment yield modulus were 0.18 L/(min·m²) and 13.12 g/(min·m²) respectively. Surface sediment yield changed from sheet erosion to rill erosion during the 10~30 min period. (2) The maximum runoff coefficient was 49% when the subsurface runoff was at a moderate slope (15°), and there was a highly significant positive correlation between runoff yield, as well as sediment yield and slope gradient. Although the correlation between underground runoff or sediment production and slope gradient was not significant, the proportion of underground runoff was still affected the

收稿日期:2024-06-08 修回日期:2024-07-25 录用日期:2024-08-07 网络首发日期(www.cnki.net):2024-11-25

资助项目:国家自然科学基金项目(42167044)

第一作者:吴光琴(1999—),男,硕士研究生,主要从事喀斯特土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:gs.wugq23@gzu.edu.cn

通信作者:戴全厚(1969—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事喀斯特水力侵蚀与生态修复重建研究。E-mail:qhdairiver@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

greatest by slope gradient. (3) The total sediment yield on the surface was greater than that in the soil layer and subsurface. The fitting relationship between the three different hydrological paths (surface, soil layer, and subsurface) and slope gradient was surface runoff > interflow > subsurface runoff. [Conclusion] In the maize slope farmland in karst areas, as the slope gradient increases, the soil erosion patterns of different soil layers show inconsistency, and the main form of soil erosion is surface erosion, supplemented by underground leakage. The maize canopy can slow down the evolution of surface soil erosion forms at small slope gradients. The research results can provide theoretical reference for estimating soil erosion in karst maize sloping farmland and maize planting strategies.

Keywords: maize slope farmland; different slopes; artificial simulation of rainfall; runoff and sediment yield; Karst

Received: 2024-06-08

Revised: 2024-07-25

Accepted: 2024-08-07

Online(www.cnki.net): 2024-11-25

坡耕地水土流失是一个全球性的环境问题,不仅直接关系到土壤资源的可持续利用,还深刻影响着农业经济发展和生态环境平衡^[1]。从农业经济学的角度来看,坡耕地水土流失导致土壤肥力下降,土壤中的氮、磷、钾等关键养分大量流失,进而影响农作物的产量和质量^[2]。坡耕地水土流失破坏当地生态环境,加剧生态失调,导致旱涝灾害频繁发生^[3]。此外,水土流失还带来水质污染问题。流失的土壤中往往含有农药^[4]、化肥^[5]等污染物,这些物质被水流裹挟进入水体,加剧水体的富营养化,威胁水资源的安全。

水土流失与坡度有着密切的关系,已有研究^[6]表明,坡度与水土流失呈显著正相关。坡耕地长期受到人为活动的持续扰动,导致其水土流失量在不同土地利用类型中始终保持着较高水平^[7]。有学者^[8]在东北地区相对平缓的黑土区内,通过构建一系列具有等差坡度(3°, 6°, 9°)的试验田,并实施秸秆覆盖的耕作模式,以此作为研究手段系统地探索了不同坡度条件下秸秆覆盖对黑土区产流产沙特性的影响规律,其结果显示秸秆覆盖能极大程度地改善地表的水土流失现象。与此同时,播种方式作为坡耕地水土流失因素之一,其所引发的坡耕地水土流失程度亦显著受制于坡度的变化^[9]。在喀斯特地区,坡度对产流产沙的影响相较于非喀斯特地区表现得更为突出和显著。坡度不仅直接影响地表径流的速度与方向,还通过改变喀斯特地下水流动过程,进一步加剧该地区坡面土壤的侵蚀程度^[10],这种双重作用机制可能使喀斯特地区坡耕地土壤侵蚀变得更加复杂且严峻,尤其在坡耕地占比高达 85.06% 的贵州省^[11]。为切实有效地保护喀斯特地区现存的耕地资源,众多学者对喀斯特坡耕地水土流失问题,开展一系列系统性的研究,如 CHEN 等^[12]研究发现,喀斯特坡耕地相同基岩裸露率但处于不同坡度时,裸露基岩能够重新分配降水和径流的方式,一定程度上有效降低土壤侵蚀强度;同时把

多种土地利用方式应用于不同坡度的喀斯特坡耕地,结果发现,即使土地利用方式不变,各坡度之间的水土流失量仍然存在显著差异^[13]。值得特别关注的是,耕作活动显著改变坡耕地的水文过程,往往导致泥沙产量增加,而坡度的存在,则进一步加剧这种由耕作引起的侵蚀效应^[14]。因此,防治喀斯特地区的坡耕地水土流失时,务必充分考虑坡度因素,同时也需精心选择并优化耕作方式,以有效遏制土壤侵蚀的加剧,保护土地资源。有学者进一步指出,喀斯特地区坡耕地所发生的水土流失现象受到雨滴直径的影响,具体表现为在同一坡度条件下,雨滴直径的增大直接导致溅蚀面积的扩大。反之,雨滴直径保持恒定时,坡度则成为决定喀斯特坡耕地土壤侵蚀程度的关键因素^[15]。该观点强调降雨物理特性(雨滴直径)与地形因素(坡度)在喀斯特坡耕地土壤侵蚀过程中的交互作用机制。在喀斯特坡耕地水土流失的研究中,多数现有研究倾向于集中探讨裸坡耕地与不同坡度间相互作用下的水土流失机制。然而,对于贵州这类全年大部分时间均被农作物覆盖的坡耕地而言^[16],此研究视角显露出明显的局限性。尽管坡度被广泛视为评估喀斯特坡耕地水土流失的一个重要变量,但现有研究往往忽略贵州雨季条件及该时期内农作物种植活动对土壤侵蚀过程的影响。玉米作为该地区种植面积最广、最为适宜的种植作物之一^[16],其种植面积占总耕地面积的 65% 以上,而在山区更是高达约 85%^[17]。表明喀斯特地区玉米坡耕地受坡度影响而造成水土流失问题,尤其是贵州玉米坡耕地在不同坡度下的产流产沙状况值得深入研究和关注。基于冠层截流作用机制,部分学者^[18]深入开展针对坡耕地冠层截流与土壤侵蚀之间关系的研究发现,玉米冠层能够显著减少雨滴的穿透率,从而大大降低降雨对土壤表面的击溅作用,并有效减缓径流的形成时间;然而,尹晓爱等^[19]模拟试验表明,玉米冠层截流形成的茎秆流增加坡耕地的产流产沙。因此,探究玉米冠层

截流对喀斯特坡耕地水土流失的影响变得迫在眉睫,同时对喀斯特玉米坡耕地水土流失治理具有一定的指导意义。

目前对喀斯特坡耕地水土流失研究的焦点主要聚焦于无植被覆盖的裸坡养分流失及秸秆覆盖度影响产流产沙的报道,然而在暴雨条件下、不同坡度的玉米坡耕地土壤侵蚀及其机理却鲜有研究。基于此,本文利用变坡钢槽和可调节人工降雨装置,深入研究喀斯特玉米坡耕地在不同坡度条件下的产流和产沙特征。目的在于探明喀斯特地区玉米坡耕地因坡度变化所引发的土壤侵蚀现象及其特性,从而为喀斯特地区玉米坡耕地的水土流失防治工作提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

试验区位于贵阳市花溪区,花溪区行政区划内大面积可溶性碳酸盐岩出露,是典型的喀斯特地质地区。为选择符合试验要求的土壤,对花溪区周边玉米坡耕地展开调查,最后选定花溪区青岩镇(106°40'19"E, 26°21'11"N)取土,该地土壤为石灰土,粉粒 48.32%,砂粒 36.58%,黏粒 15.1%,平均质量密度 1.05 g/cm³,pH 为 7.7,有机质 9.82 g/kg,属于典型的喀斯特区土壤。

分层采集 0—30 cm 的表层土壤,首先去除土壤中的植物残体和较大的石块,接着对较大的土块进行分散处理,使其细化。最后,将处理后的土壤通过 5 mm 孔径的筛子进行筛选,以确保土壤颗粒的均匀性,并完成填土过程。

设备由变坡钢槽和全自动下喷式人工降雨器组成(图 1)。钢槽长 2 m,宽 1 m,深 0.35 m,底部均匀打上长 10 cm,宽 2 cm 的 50 个孔,模仿地下裂隙度(地下裂隙度为地下裂隙水平投影面积占钢槽底板总面积的百分比),地下裂隙能在 1%~5% 调节;钢槽坡度能在 0~25° 进行调节,钢槽下端有 3 个“V”形集流槽,集流槽由上至下为地表产流产沙接口、壤中产流产沙接口(壤中流是钢槽中土层厚度为 0—30 cm 产流)和地下产流产沙接口,每个接口连接上塑料软管且软管能自然下垂至地面。人工降雨器是西安清远测控技术有限公司生产的 QYJY501 型便携式全自动下喷式人工模拟降雨器,降雨高度为 6 m,降雨强度为 10~200 mm/h;可手动控制,调节精度为 7 mm/h,调节变化时间<30 s,雨滴大小调控范围为 0.37~6.00 mm,降雨有效面积为 6.5 m×6.5 m,降雨均匀度>85%,试验钢槽周边放置雨量筒测定强度。

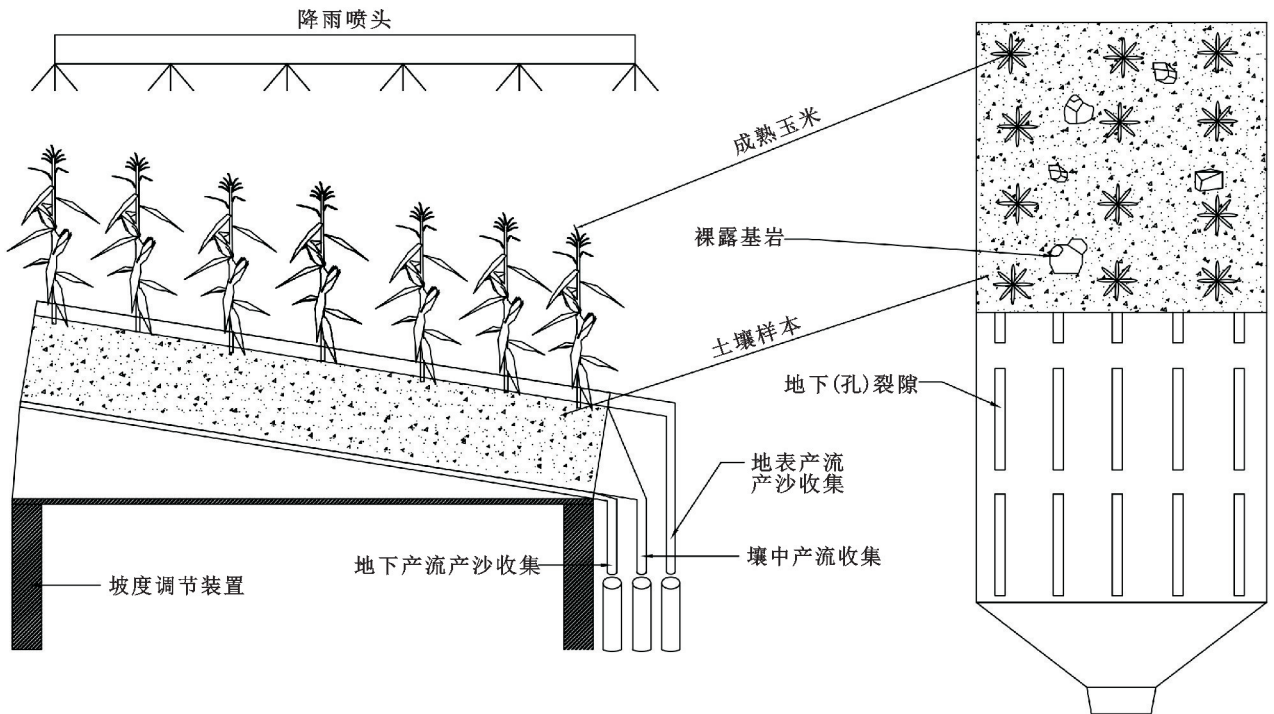


图 1 降雨设备及钢槽示意

Fig.1 Schematic diagram of the rainfall equipment and steel channels

1.2 试验设计

据调查^[20]表明,贵州省暴雨的降雨强度主要集中在 50~75 mm/h,《土地利用现状调查技术规范》^[21]中明确指出坡度在 2°~6° 的坡耕地易发生轻度土壤侵蚀,而坡度超过 25° 则不适宜农作物的种植。

鉴于此,本研究设计 5 个等差坡度进行试验,坡度分别为 5°,10°,15°,20°,25°,以全面考察不同坡度对坡耕地土壤侵蚀的影响。在具体实施时,本次试验选定具有代表性的降雨强度 60 mm/h,并严格控制其他所有试验条件保持不变,具体包括:将裂隙度统一设

定为 1%，基岩裸露率控制为 10% 且降雨过程持续 60 min，以此确保试验结果的准确性和可比性。

试验于 2022 年 6 月 2 日至 7 月 24 日在贵州大学南校区模拟降雨大厅进行，填土前先将钢槽置于水平，经过计算后调节钢槽底部底板之间孔洞的重合面积得到裂隙度为 1% 后选择直径 > 35 cm 的石灰岩块石测量并标记出 30 cm 以上部分露头面积，随机排列在试验钢槽中，使岩石 30 cm 以上部分的裸露率达野外玉米坡耕地调查结果（裸露率为 10%），之后回填土壤，自下而上按野外实测土壤紧实度分层装填土壤并使填土表面与岩石 30 cm 标记处齐平，每层填土厚度为 10 cm 分 3 次填入，由上至下各土层土壤质量密度为 0.99, 1.03, 1.12 g/cm³，填入土壤总厚度为 30 cm（土壤压实面低于钢槽 5 cm）。填土完成后，根据实地调查结果按照 4 333 株/hm² 的种植密度，将夏季成熟的玉米按照实际长势和分布格局整株埋入变坡钢槽中，以模拟真实的作物覆盖情况。埋入钢槽的玉米植株由土壤取样地附近农民分批次种植培养，以确保玉米生长过程无差异。玉米成熟时利用铁锹以玉米根茎部为中心，半径为 15 cm，深为 10 cm 取柱形土体将玉米植株与土块一起挖出随后移植到钢槽中，培养 1 周后开始进行降雨试验。试验开始前以小雨（10 mm/h）沉降达到饱和时再开始进行试验。开始试验前将塑料软管置于容器中，达降雨时段时（降雨前 30 min 每 5 min 为降雨时段，后 30 min 每 10 min 为降雨时段，降雨历时 60 min）立马更换容器。各坡度进行 3 次重复试验，每场降雨试验后更换表层 10 cm 土壤并达到设计要求后开始下一场降雨。一场降雨完成后对容器中产流量进行测量，各产流测量后静置 24 h，取下层浑浊液放置于铝盒中，转移至 105 °C 烘箱中烘干至恒重（8 h），再用电子天平称量产沙量。每个坡度试验结束后需进行全部土样更换，且水平填土后调至对应坡度重新选取玉米植株按照试验设计要求进行各因素的设定，如此重复 5 个坡度，每坡度重复 3 次试验，共计 15 场降雨，405 个样品。

1.3 数据处理

试验数据使用 Excel 2016 软件对数据进行处理，使用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素相关性分析和 Pearson 相关性分析，用 CAD 2022 和 origin 2024 软件制图。

产流模数计算公式为：

$$M = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

式中： M 为产流模数 [L/(m² · min)]； Q 为流速 (L/min)； A 为面积 (m²)。

径流系数指任一时期的径流深度（或总径流）与同一时期的降水深度（或总降水）之比。径流系数表示降雨变成径流的比例，综合反映自然地理因素对降水与径流关系的影响。

$$C_r = \frac{R_i}{R} \quad (2)$$

式中： C_r 为径流系数； R_i 为地表产流、壤中产流或者地下产流 (L)； R 为总径流 (L)。

输沙模数是指在单位面积单位时间内泥沙的产沙量，计算公式为：

$$K = \frac{G}{ST} \quad (3)$$

式中： K 为输沙模数 [g/(m² · min)]； G 为产沙量 (g)； S 为钢槽投影面积 (m²)； T 为降雨历时 (min)。

2 结果与分析

2.1 不同坡度下玉米坡耕地地表产流产沙特征

由图 2 可知，不同坡度下地表产流均在试验时段内达到稳定状态，由于坡度不一致，达到稳定产流时段存在一定差异。不同的是 5° 和 10° 稳定产流时间（30 min）早于另外 3 个坡度（40 min），地表产流总量为 13.25~22.05 L（表 1）。坡度增至 25° 使得地表产流模数增加 0.07 L/(min · m²)，径流系数亦随坡度增加而增加，最大值为 33.60%，意味着随坡度增加地表受到降雨冲刷作用加剧，增加地表土壤被侵蚀的风险，地表产沙量证实地表土壤所遭受的侵蚀强度随着地形坡度的变化而变化。具体而言，地表产沙总量 12.76~23.78 g（表 1），是地下产沙量的 4.12~11.27 倍、壤中产沙量的 5.18~12.05 倍。地表产沙量 25° 比 5° 增加 86.32%；20° 和 25° 在 40 min 时稳定输出产沙。输沙模数代表径流运移泥沙的难易程度，仅 5° 和 10° 输沙模数未见显著性差异，其余坡度间输沙模数均有显著差异。说明 25° 地表土壤最易被侵蚀，20° 次之，15° 是划分喀斯特玉米坡耕地运移泥沙的临界坡度。地表产流 ($R^2 = 0.951$)、地表产沙 ($R^2 = 0.992$) 与坡度的拟合度高（图 3），即表明喀斯特区域玉米坡耕地发生水土流失时，坡度是影响地表产流产沙的重要因子。地表产沙均存在单位时间内产沙量快速增加阶段，5° 和 25° 在 20~25 min 内单位时间产沙量最大，10° 在 10~20 min 内产沙量快速增长，15° 产沙量最大增量在 15~20 min，20° 单位时间内最大产沙量在 0~20 min，此时各坡度输沙率关系为 5° > 25° > 10° > 15° > 20°，最大输沙率为 0.422 g/min，最小输沙率为 0.105 g/min。

2.2 不同坡度下玉米坡耕地壤中产流产沙特征

由图 4 可知，壤中产流量随降雨历时和坡度增加而增加，连续产流 40 min 后各坡度产流稳定。产流

总量、产流模数随坡度的变化均有显著性差异(表 2),5°增加至 25°壤中总产流量增加 12.95 L,同比增加 69.92%,壤中产流模数增加 0.108 L/(min·m²),其产流模数受坡度影响远高于地表、地下。随着坡度的增加,壤中径流系数整体呈上升趋势,但值得注意的是,当坡度从 15°增加到 25°时,径流系数反而从 49%下降至 48%,该结果反映坡度对壤中径流系数的影响,特别是在中等坡度(15°)以下壤中径流系数随坡度升高。壤中产流总量与坡度之间的拟合程

度较高($R^2=0.924$),显示二者之间的强相关性。进一步对比 3 种不同水文路径(地表、壤中、地下)与坡度的拟合关系时发现,地表径流与坡度的拟合度最高,壤中径流次之,而地下径流与坡度的拟合度最低(图 3)。壤中产沙总量在 1.97~2.88 g,远小于地表产沙,略小于地下产沙;输沙模数亦表明,壤中产沙并未与产流量存在强关联性,故壤中泥沙的运移方式并不是由于径流汇集搬运形成,可能与土体的滑动相关。

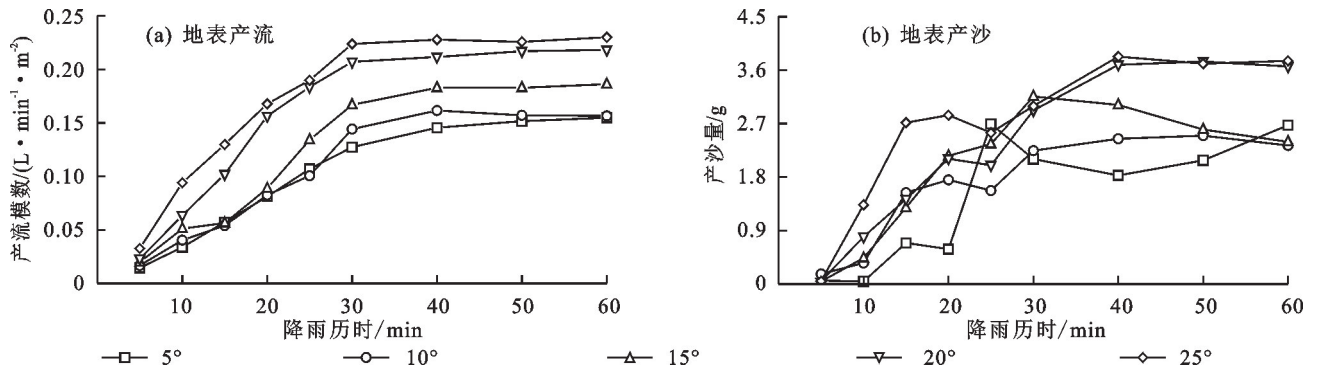


图 2 地表产流产沙过程

Fig.2 Diagram of the sand production process in surface flow

表 1 不同坡度玉米耕地地表产流产沙特征

Table 1 Characteristics of surface runoff and sand production on maize cropland with different slope gradients

坡度/(°)	产流 总量/L	产流模数/ (L·min ⁻¹ ·m ⁻²)	径流 系数/%	产沙量/g	输沙模数/ (g·min ⁻¹ ·m ⁻²)
5	13.25±0.10e	0.11±0.02d	28.003±0.005d	12.76±0.98d	6.41±0.49d
10	13.89±0.25d	0.12±0.01d	27.001±0.004c	14.91±0.86d	7.57±0.43d
15	16.21±0.32c	0.14±0.01c	28.667±0.006c	17.44±2.02c	9.03±1.04c
20	20.29±0.30b	0.17±0.03b	32.684±0.006b	20.40±1.77b	10.85±0.94b
25	22.05±0.21a	0.18±0.01a	33.607±0.006a	23.78±1.45a	13.12±0.80a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同坡度间差异显著($p<0.05$)。下同。

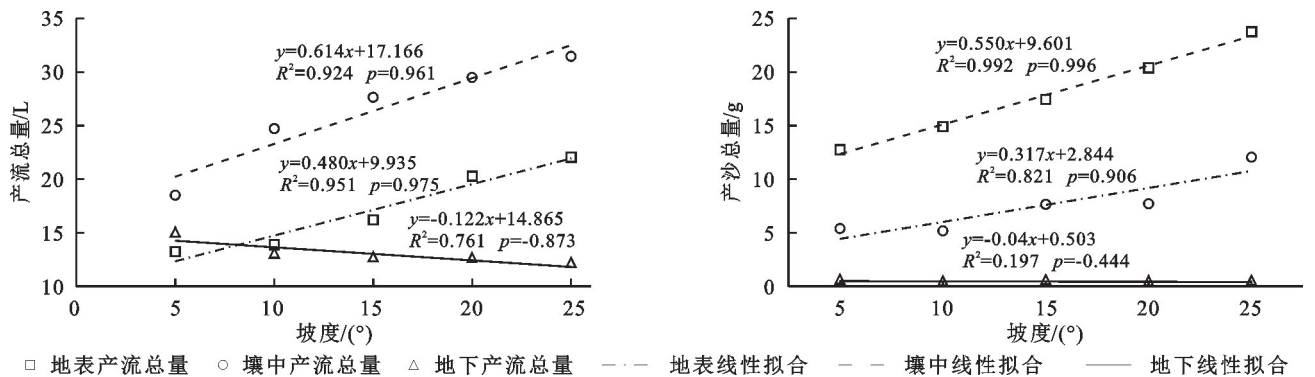


图 3 不同产流产沙类型拟合

Fig.3 Fitting of different flow and sand production types

2.3 不同坡度下玉米坡耕地地下产流产沙特征

地下产流是喀斯特地区由于特殊的地质构造导致降雨入渗后通过地下裂隙汇入地下水系统的现象,各坡度的地下产流量均存在显著性差异,且与坡度呈

反比(表 3)。由图 5 可知,在 5°坡度下,地下产流量显著高于其他坡度的产流量,而其余坡度的产流量则展现出几乎相同的变化趋势,均在 40 min 时达到稳定产流状态。地下产流模数受坡度影响最小,仅变化

0.023 L/(min · m²),其速率小于地表与壤中;但地下径流系数变化高于地表和壤中,说明地下产流的比重受坡度的影响最大。地下产沙总量为 2.11~3.10 g,其产沙总量关系为 5°>10°>15°>20°>25°,随坡度变化地下产沙总量、输沙模数间也出现显著性的差异(10°和 15°除外)。地下产流和产沙与坡度的线性拟合度并不高,具体而言,地下产流与坡度的线性

拟合 R² 为0.761,而产沙与坡度的线性拟合 R² 仅为 0.197(图 3),这表明二者与坡度之间的线性关系并不强。地表产流总量远大于地下产流总量,即坡度增加使土壤表面汇流时间缩短,进而导致降雨入渗减少,因而减少地下产流,说明坡度能够有效抑制地下径流的产生,结合前文叙述减少的地下产流以地表、壤中产流的形式产出。

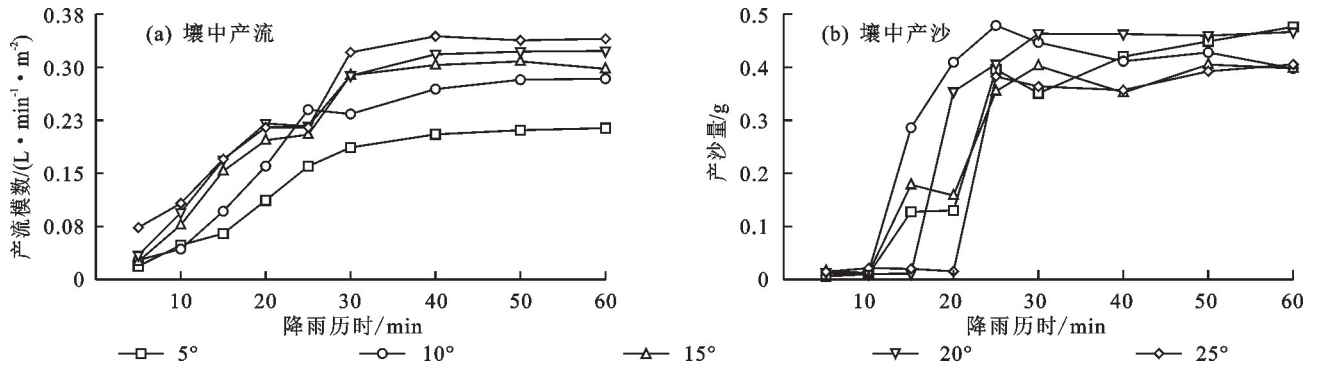


图 4 壤中产流产沙过程

Fig.4 Diagram of the sand production process in the soil

表 2 不同坡度玉米坡耕地壤中产流产沙特征

Table 2 Characteristics of sediment yield and flow in the soil of maize sloping cropland with different slope gradients

坡度/(°)	产流 总量/L	产流模数/ (L · min ⁻¹ · m ⁻²)	径流 系数/%	产沙 总量/g	输沙模数/ (g · min ⁻¹ · m ⁻²)
5	18.52±0.24e	0.154±0.002e	39.593±0.003c	2.37±0.08b	1.19±0.04bc
10	24.72±0.02d	0.206±0.001d	47.832±0.004b	2.88±0.20a	1.46±0.10a
15	27.65±0.22c	0.230±0.002c	49.019±0.001a	2.28±0.26bc	1.18±0.14bc
20	29.50±0.48b	0.246±0.004b	47.183±0.004b	2.65±0.26ab	1.41±0.14ab
25	31.47±0.46a	0.262±0.004a	47.962±0.005b	1.97±0.15c	1.08±0.08c

表 3 不同坡度地下产流产沙特征

Table 3 Characteristics of subsurface flow and sand production on different slopes

坡度/(°)	产流 总量/L	产流模数/ (L · min ⁻¹ · m ⁻²)	径流 系数/%	产沙 总量/g	输沙模数/ (g · min ⁻¹ · m ⁻²)
5	14.93±0.15a	0.123±0.006a	32.404±0.002a	3.10±0.19a	1.56±0.10a
10	12.97±0.08b	0.110±0.002b	25.167±0.001b	2.86±0.25ab	1.45±0.13ab
15	12.61±0.11c	0.107±0.006bc	22.314±0.003c	2.62±0.15b	1.36±0.08bc
20	12.55±0.14d	0.103±0.006bc	20.133±0.002d	2.29±0.08c	1.22±0.05cd
25	12.08±0.08e	0.100±0.003c	18.431±0.002e	2.11±0.08c	1.16±0.05d

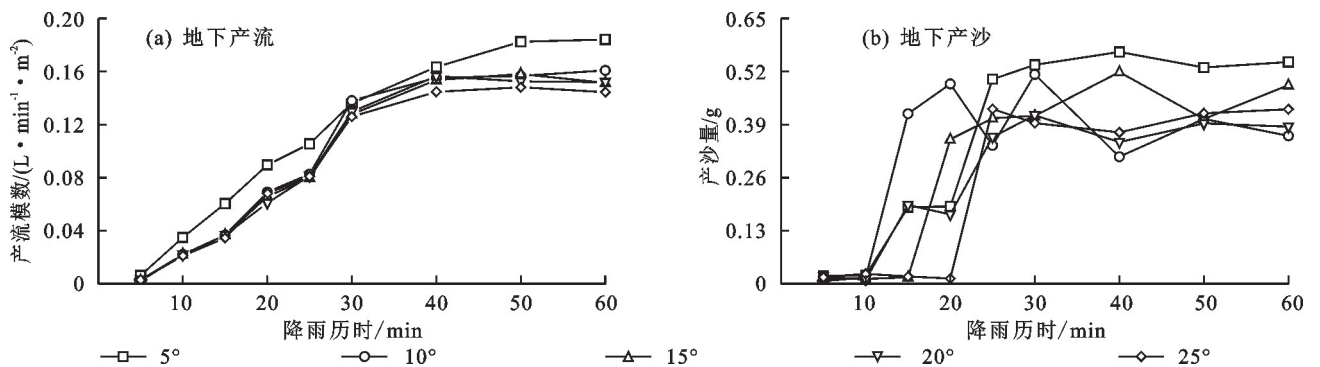


图 5 地下产流产沙过程

Fig.5 Diagram of the sand production process in subsurface production streams

2.4 坡度与各水文路径产流产沙相关性分析

喀斯特区域由于特殊的构造导致其水土流失复杂,为明确坡度同3种水文路径的关系,对玉米坡耕地地表、壤中和地下产流产沙进行 Pearson 相关性分析。由表4可知,坡度与地表产流、产沙在0.01水平上呈极

显著正相关,相关系数分别为0.975,0.985;壤中产流、产沙与坡度在0.01水平上呈极显著正相关,相关系数分别为0.962,0.961。地下产流、产沙与坡度呈负相关,仅地下产沙与坡度呈显著负相关,地下产流同坡度在0.05水平上未表现出显著相关性。

表4 坡度与产流产沙的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between slope gradient and flow and sand production

指标	坡度	地表产流	地表产沙	壤中产流	壤中产沙	地下产流	地下产沙
坡度	1.000						
地表产流	0.975**	1.000					
地表产沙	0.985**	0.996**	1.000				
壤中产流	0.962**	0.886*	0.920*	1.000			
壤中产沙	0.961**	0.886*	0.921*	0.986**	1.000		
地下产流	-0.872	-0.752	-0.799	-0.969**	-0.970**	1.000	
地下产沙	-0.941*	-0.858	-0.895*	-0.995**	-0.995**	0.982**	1.000

注: **表示各因子在1%水平上的差异性($p < 0.01$); *表示各因子在5%水平上的差异性($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 坡度对坡耕地地表产流产沙的影响

坡度是地表产流产沙形成和发展的重要因素之一^[10],随着坡度增加,地表产流量、产沙量也相应增加。然而坡度与地表产流产沙并非简单的线性关系,在一定坡度范围内,地表产流产沙随坡度呈正相关,当坡度超过临界坡度时,地表产流产沙与坡度将呈负相关关系,造成该现象主要是达到临界坡度后坡面承雨量随着坡度增大而减小^[22];然而喀斯特地区土被不连续、土层薄及岩石裸露率高等特点上述研究并未纳入考虑。本研究基于喀斯特区土壤、植被及坡度因素进行试验发现,地表产流产沙与坡度呈极显著正相关,地表在降雨后期(40~60 min)稳定产流,与WANG等^[23]产流结果基本一致;地表单位时间内的产沙量主要集中在10~30 min窗口期内,与地表产流模数的变化趋势高度一致。这一吻合性不仅揭示地表径流与土壤侵蚀之间的紧密联系,而且进一步指示特定时间段内土壤流失量的显著增长,该产流现象可能与玉米冠层有关。具体而言,玉米冠层能减小雨滴的溅蚀作用,但玉米枝叶所拦截的降雨在冠层达到枝叶的最大持水量后转变为玉米茎秆流,此时造成单位时间内的土壤流失量较大,即本研究中地表产沙快速增加的过程。所得结果表明,当降雨强度较大或持续时间较长时,地表径流迅速汇集并形成强大的水流,对土壤进行冲刷和搬运,导致地表水土流失现象的发生。因此,在喀斯特地区坡耕地上,水土流失过程在暴雨的强烈冲刷作用下,经历从面蚀到细沟侵蚀,并最终演变成成为沟壑侵蚀的复杂过程。这一演变过程导致地表产沙的稳定时间与稳定产流时间呈现出高度的同步性,因

此在喀斯特区域进行水土流失防治的第一要点就是控制水力侵蚀。

3.2 坡度对坡耕地壤中产流产沙的影响

壤中流是土壤中沿不同透水性土壤层界面流动的水流^[24],本研究发现,喀斯特地区坡耕地壤中流在15°时径流系数最大,此时土体稳定性最差,可能造成土壤的蠕动,进而容易引发地质灾害^[25]。可能与地表有无植被有关,因为植被冠层截流导致部分降雨通过茎秆流的形式入渗土壤,增加土体的不稳定性。此外,降雨历时也是影响壤中产流的原因之一。在坡度较缓的情况下,雨滴与表面土壤的夹角较大,能够迅速渗透土壤,使土壤在短时间内达到最大持水能力。然而,喀斯特地区特有的地下漏失现象加剧这一过程,导致大量入渗的降雨以地下产流的形式迅速流失。随着坡度的增加,地表汇流时间显著缩短,同时地表径流受到沿土壤表面重力作用的增强,该作用促使水流加速沿坡面流动,进而减少降雨的入渗量。而处于中等坡度(15°)时,随着坡度的变化,降雨下渗通道与地下裂隙之间所形成的角度也相应改变,这一变化降低降雨继续向下渗透并转化为地下径流的可能性。所以,在该坡度下壤中径流系数占据最大比例^[26]。樊桐桐等^[27]通过冲刷边坡试验得到相似的结果,壤中流在试验过程均先上升达到峰值后下降,认为当坡度过大时,地表坡面更容易形成细沟,这些细沟不仅有利于径流的集中,还为径流提供顺畅的通道,导致壤中产流系数呈现似单驼峰变化。但与一些研究结果存在一定差异,如对黑土区的壤中流进行动力学模型研究发现,黑土区壤中流无论实测值亦或是模型模拟值,均随坡度增加逐渐增加^[28]。可见,不同

地区的土壤壤中流对于坡度变化的响应机制是有差异的,因此,坡度对壤中流的影响不能一概而论,不同区域的土壤及降雨入渗后的水文路径的分布均影响壤中流。目前,关于壤中流的水文路径及其泥沙运移方式的认知尚不全面,为深入理解喀斯特地区壤中流是否可能加剧土壤蠕动,需要开展长期、系统的研究,以深入探讨壤中流导致的水土流失原理、内在机制及其危害,为全面了解喀斯特地区土壤水土流失问题提供理论基础。

3.3 坡度对坡耕地地下产流产沙的影响

喀斯特特殊的“二元结构”使得该地区水土流失呈现出地表和地下 2 个部分的流失,形成紧密联系的地上流失和地下漏失,对于地下漏失因素研究颇多,如地下(孔)裂隙所占比例^[6]、地下孔径大小^[29]、坡度^[10]等都对地下产流产沙造成影响。本试验从喀斯特玉米坡耕地角度出发探讨在不同坡度下地下漏失情况,结果表明,地下产流和地下径流系数都随坡度增加逐渐减小,分析其原因是随坡度越大,在重力作用下水流速度加快,水动能增加,导致水流更容易在地表形成径流,加上由于流速快,水流与地表的接触时间变短,从而导致地下产流减少,与 YAN 等^[6]研究结果一致,同时也反映出玉米冠层截流拦蓄对喀斯特地下径流影响较小;地下输沙模数也随坡度增加呈减小趋势,随着坡度的增大,土壤颗粒在顺坡方向上受到的分力也相应增大。这种增大的分力导致土壤颗粒之间的摩擦力增强,当这种摩擦力超过土壤颗粒向下移动的作用力时,泥沙便在地下孔(裂)隙中逐渐堆积。随着时间的不断推移,泥沙的堆积量逐渐增大,最终导致输沙模数的减小,AO 等^[10]研究岩溶地区矿区边坡的降雨侵蚀也取得相似的研究结果。与此同时,喀斯特地区地下径流也受到地表植被覆盖的影响,进而随着坡度增加进一步影响地下产流产沙,但也有研究^[30]发现,喀斯特岩溶边坡地下产流随坡度增加呈先增加后减小的趋势。因此,喀斯特地区因其复杂的地下漏失机制,导致地下产流产沙对坡度的响应呈现差异化。由此可见,喀斯特地区地下漏失受坡度的影响不能一概而论,不同研究对象在同一坡度下的地下产流产沙表现各异。然而,喀斯特地区的水土流失受到多种复杂因素的共同影响,除本研究涉及的方面外,还包括降雨强度、多变的岩石裸露率及地下孔(裂)隙分布不均等关键因素。因此,深入探究多种作物种植模式的优化、地下孔(裂)隙的具体分布形态及其孔径大小等因素如何综合作用于喀斯特坡耕地的产流产沙过程,将成为未来研究的内容之一,旨

在更全面地理解并有效治理该区域的水土流失问题。

4 结论

地表产流产沙与坡度呈显著正相关,产流、产沙总量随坡度的增加而增大,均在最大坡度(25°)时达到最大值。壤中产流同样受坡度影响,但在中等坡度时(15°)径流模数较大,可能导致土体稳定性降低。壤中产沙量较小,但坡度与产流量关联性极强。相比之下,地下产流、产沙与坡度关系不显著,但地下产流、产沙与坡度呈负相关。值得注意的是,地下径流系数变化率最高,表明地下产流占比受坡度影响最大。地表产沙量的变化可能受植被覆盖影响,导致与坡度的关系不一致。综上所述,坡度对不同土层产流产沙的影响存在差异,且受多种因素共同作用。在喀斯特地区坡耕地管理中,应综合考虑坡度、植被覆盖等因素,以维护土体稳定性和减少水土流失。

参考文献:

- [1] HUO J Y, YU X X, LIU C J, et al. Effects of soil and water conservation management and rainfall types on runoff and soil loss for a sloping area in North China[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(15): 2117-2130.
- [2] 姚一文,戴全厚,甘艺贤,等.雨强和地下孔(裂)隙度对喀斯特坡耕地养分流失的影响[J].*中国农业科学*, 2021, 54(1): 140-151.
- [3] YAO Y W, DAI Q H, GAN Y X, et al. Effects of rainfall intensity and underground hole (fracture) gap on nutrient loss in Karst sloping farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 140-151.
- [4] WANG Y, ZHANG Y X, XIAN Y C, et al. Horizontal and vertical variations in soil fertility in response to soil translocation due to tillage-induced erosion on sloping cropland[J]. *Catena*, 2024, 242: e108089.
- [5] ZHANG Y, YAN Y J, DAI Q H, et al. Glyphosate spraying exacerbates nitrogen and phosphorus loss in Karst slope farmland[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 196(1): e80.
- [6] LIU X Y, SHI H D, BAI Z K, et al. Assessing soil acidification of croplands in the Poyang Lake Basin of China from 2012 to 2018[J]. *Sustainability*, 2020, 12(8): e3072.
- [7] YAN Y J, TU N, CEN L P, et al. Characteristics and dynamic mechanism of rill erosion driven by extreme rainfall on Karst Plateau slopes, SW China[J]. *Catena*, 2024, 238: e107890.
- [8] GAN F L, SHI H L, GOU J F, et al. Responses of soil aggregate stability and soil erosion resistance to different bedrock strata dip and land use types in the Karst trough valley of Southwest China [J]. *International Soil and*

- Water Conservation Research, 2024, 12(3): 684-696.
- [8] 李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 37-42.
LI F, HAN X, MA X L, et al. Straw mulch controls runoff and nitrogen and phosphorus loss from slope farmland in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 37-42.
- [9] 朱上卿, 赵桂茹, 安瞳昕, 等. 不同播种方式微地形差异对坡耕地水土流失的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 43-51.
ZHU S Q, ZHAO G R, AN T X, et al. Effects of microtopography difference of different sowing patterns on soil and water loss in sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 43-51.
- [10] AO L M, WU Y Q, XU Q X, et al. Subsurface flow aggravates the soil erosion on steep slopes in Karst post-mining areas[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: e101667.
- [11] 贵州省第三次全国国土调查领导小组办公室, 贵州省自然资源厅, 贵州省统计局. 贵州省第三次全国国土调查主要数据公报[R]. 2021.
Office of Guizhou Provincial Leading Group for the Third National Land Survey, Guizhou Provincial Department of Natural Resources, Guizhou Provincial Bureau of Statistics. Bulletin of Key Data of the Third National Land Survey in Guizhou Province[R]. 2021.
- [12] CHEN L, ZHANG K L, LI Y T. Spatial variations in soil erodibility induced by rock outcropping on sloping cropland in the Karst region of Southwest China[J]. Geoderma, 2023, 440: e116705.
- [13] CHEN L, LI Y T, ZHANG Z D. Impact of land use type and slope position on the erodibility of Karst hillslopes in Southwest China[J]. Catena, 2023, 233: e107498.
- [14] DAI J D, ZHANG J H, ZHANG Z H, et al. Effects of water discharge rate and slope gradient on runoff and sediment yield related to tillage erosion[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(6): 849-861.
- [15] 岑龙沛. 喀斯特坡耕地雨滴击溅土壤结构破坏机制[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
CEN L P. Failure mechanism of soil structure splashed by raindrops on Karst sloping farmland[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [16] YAN Q X, FANG H, WANG D P, et al. Transfer and transformation characteristics of Zn and Cd in soil-rotation plant (*Brassica napus* L. and *Oryza sativa* L.) system and its influencing factors[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): e7393.
- [17] WANG D, LI Z G, WANG Q F. Ecological restoration reduces mercury in corn kernel and the distinction of mercury in corn plants in rural China: A case in Wuchuan mercury mining area[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 271: e115964.
- [18] 张丽敏, 郭建平, 庄立伟, 等. 中国主产区玉米冠层对降水的截留研究[J]. 气象, 2021, 47(5): 619-626.
ZHANG L M, GUO J P, ZHUANG L W, et al. Study on canopy interception in main maize producing areas in China[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(5): 619-626.
- [19] 尹晓爱, 方乾, 杨通杭, 等. 模拟玉米茎秆流对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 67-72.
YIN X A, FANG Q, YANG T H, et al. Effect of simulated corn stem flow on soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 67-72.
- [20] WEI B, LI Z W, DUAN L X, et al. Vegetation types and rainfall regimes impact on surface runoff and soil erosion over 10 years in Karst hillslopes[J]. Catena, 2023, 232: e107443.
- [21] 全国农业区划委员会. 土地利用现状调查技术规程. [M]. 北京: 测绘出版社, 1984: 5-12.
National Commission on Agricultural Zoning. Technical regulations for the survey of current land use situations[M]. Beijing: SinoMaps, 1984: 5-12.
- [22] 向宇国, 张丹, 陈凡, 等. 降雨和坡度对植烟坡耕地产流产沙的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5): 1121-1127.
XIANG Y G, ZHANG D, CHEN F, et al. Effect of rainfall and slope on runoff and sediment production of tobacco slope farmland[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(5): 1121-1127.
- [23] WANG Y, DAI Q H, DING P W, et al. Effects of rainfall intensity and underground pore density on the soil erosion mechanism of sloping maize farmland in a typical Karst area of SW China[J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(7): 1910-1925.
- [24] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
RUI X F. Principles of hydrology[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2004.
- [25] 李文凯. 近崩壁坡面土壤水分动态特征及崩壁稳定性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
LI W K. Dynamic characteristics of soil moisture and stability of slope near collapse wall[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [26] FEI K, SUN T, DENG L, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradients on total carbon, nitrogen, and phosphorus lateral transport under simulated extraordinary rainstorm[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 77: 589-599.

- [27] 樊桐桐,王冬梅,张泽洲,等.放水冲刷条件下工程边坡产流产沙及氮磷输出特征[J].水土保持学报,2023,37(4):101-109.
FAN T T, WANG D M, ZHANG Z Z, et al. Characteristics of runoff, sediment and nitrogen and phosphorus output of steep slope of abandoned soil deposits under scouring flow[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):101-109.
- [28] 曹程鹏,张飞,段建明.黑土区坡耕地壤中流水平迁移动力学模型研究[J].水土保持研究,2019,26(4):259-264.
CAO C P, ZHANG F, DUAN J M. Study on the dynamics model of horizontal migration of interflow in cropland in black soil area[J].Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4):259-264.
- [29] 司琴,赖本忠,付智勇,等.管道孔径对西南喀斯特坡地水土漏失的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):49-56.
SI Q, LAI B Z, FU Z Y, et al. Impact of conduit aperture on soil and water loss on Karst slope in Southwest China[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):49-56.
- [30] PENG X D, DAI Q H, DING G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the Karst rocky desertification area[J].Journal of Hydrology, 2019, 578:e124086.
- (上接第 12 页)
- [82] 王凡,曹银贵,王玲玲,等.土壤微生物及酶活性对露天矿不同土壤重构方式的响应特征[J].煤炭科学技术, 2022, 50(9):249-260.
WANG F, CAO Y G, WANG L L, et al. Response characteristics of soil microorganisms and enzyme activities to different soil remodeling modes in open-pit mine [J].Coal Science and Technology, 2022, 50(9):249-260.
- [83] 王华龙.高潜水位矿区不同充填材料复垦土壤有机碳空间分布与影响因素研究[D].山东 泰安:山东农业大学, 2023.
WANG H L. Spatial distribution and influence factors of soil organic carbon reclaimed by different filling materials in high diving level mining area: A case study on the Jining mining area[D].Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [84] 侯湖平,王琛,李金融,等.煤矸石充填不同复垦年限土壤细菌群落结构及其酶活性[J].中国环境科学,2017,37(11):4230-4240.
HOU H P, WANG C, LI J R, et al. Variation of bacterial community structure and enzyme activities in reclaimed soil filled with coal gangues along a reclamation chronosequence [J].China Environmental Science, 2017, 37(11):4230-4240.
- [85] ZHU F N, LIN X X, GUAN S, et al. Deep incorporation of corn straw benefits soil organic carbon and microbial community composition in a black soil of Northeast China [J].Soil Use and Management, 2022, 38(2):1266-1279.
- [86] 丛萍,王婧,董建新,等.秸秆还田对黑土亚表层微生物群落结构的影响特征及原因分析[J].农业工程学报, 2020, 36(1):109-118.
CONG P, WANG J, DONG J X, et al. Effects and analysis of straw returning on subsoil microbial community structure in black soil[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1):109-118.
- [87] CHENU C, ANGERS D A, BARRÉ P, et al. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations[J].Soil and Tillage Research, 2019, 188:41-52.
- [88] 焦赫,李新举.煤矸石充填复垦土壤细菌群落变化[J].煤炭学报, 2021, 46(10):3332-3341.
JIAO H, LI X J. Variation in the soil bacterial community of reclaimed land filled with coal gangue[J].Journal of China Coal Society, 2021, 46(10):3332-3341.
- [89] YANG H S, ZHAI S L, LI Y F, et al. Waterlogging reduction and wheat yield increase through long-term ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system [J].Field Crops Research, 2017, 209:189-197.
- [90] 王琳琳,李素艳,孙向阳,等.不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响[J].生态学报, 2015, 35(5):1388-1398.
WANG L L, LI S Y, SUN X Y, et al. Application of salt-isolation materials to a coastal region: Effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of Robinia pseudoacacia[J].Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5):1388-1398.