

黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究

孙从建^{1,2}, 侯慧新¹, 陈伟¹, 杨伟¹, 郑振婧¹

(1.山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041000; 2.中国科学院 新疆生态与地理研究所

荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘 要:为了分析不同农作物的产流产沙特性,基于冯家沟水土保持监测站 2014—2016 年的自然降雨数据及 5 种不同农作物(红薯、谷子、玉米、大豆、土豆)覆盖下的产流产沙量观测数据,分析了 15°黄土坡面不同类型降雨条件下不同农作物产流产沙量规律。结果表明:(1)不同场次降雨中,玉米措施产流量及土壤流失量较大,红薯措施与谷子措施较小,土豆措施与大豆措施产流量及土壤流失量差别不大。(2)不同农作物的小区产流产沙量均与最大 30 min 降雨强度 I_{30} 及降雨量呈显著和极显著相关关系。(3)研究区侵蚀性降水根据降雨量、降雨历时及 I_{30} 可分为 3 种类型:Ⅰ雨型(降雨量、历时、雨强适中)、Ⅱ雨型(历时较长、雨量大、雨强较小)、Ⅲ雨型(历时短、降雨量较小、雨强大)。(4)5 种作物在不同雨型下产流产沙特性不同,在Ⅲ雨型(降雨强度大、历时短)条件下各作物措施产流量及土壤流失量最大,不同雨型条件下红薯产流量及土壤流失量最小。相比其他农作物,红薯是研究区坡耕地水土流失防治的优良农作物,玉米不适用于坡耕地水土流失防治中种植。

关键词:产流产沙特性;黄土高原;丘陵沟壑区;农作物

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0099-05

Research on Characteristics of Runoff and Sediment Yield of Typical Crop Field in the Hilly-Gully Region of the Loess Plateau

SUN Congjian^{1,2}, HOU Huixin¹, CHEN Wei¹, YANG Wei¹, ZHENG Zhenjing¹

(1.School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China; 2.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to assess the characteristics of soil and water conservation, the data of individual rainfall, runoff and sediment yield of five crop fields (sweet potato, millet, corn, soybeans, potatoes) from 2014 to 2016 in Fengjiagou station were used, and runoff and sediment yields of the different crop fields with 15° slope gradient under different rainfall events were systematically analyzed. The results showed that: (1) under different rainfall events, the runoff and sediment yield of maize field was greater, those of sweet potato and millet fields were less, and those of potato and soybean showed are almost the same; (2) runoff and sediment yields in different crop fields were significantly or very significantly related with I_{30} and rainfall amount, and the coefficients were different; (3) erosive rainfall could be divided into 3 types based on the total rainfall amount, duration of rainfall and I_{30} : rainfall type I (the rainfall, duration and I_{30} are moderate), rainfall type II (the rainfall is large, the duration is long and I_{30} is small), rainfall type III (the rainfall is small, the duration is short, I_{30} is large); (4) characteristics of the runoff and sediment yield in 5 types of crop fields under different rainfall types were different, the yield of runoff and sediment was the greatest under with rainfall type III, the yield of runoff and sediment of sweet potato field was the least under different rainfall patterns. In the study area, compared with other crops, sweet potato was better for soil erosion control and corn was not suitable for soil erosion control in the slope cultivated land.

Keywords: the Loess Plateau; Hilly-gully regions; crops; characteristics of sand production

收稿日期:2019-03-31

修回日期:2019-05-20

资助项目:山西省研究生教改项目(2018JG57,2019JG123);山西师范大学教改项目(2018JGXM-08);国家自然科学基金(41601317)

第一作者:孙从建(1986—),男,河北沧州人,副教授,博士(后),主要从事气候变化与水循环研究。E-mail:suncongjian@sina.com

通信作者:陈伟(1987—),女,辽宁铁岭人,副教授,博士研究生,主要从事土壤学研究。E-mail:wan_xin_chen@126.com

水土资源作为人类生存发展中最重要自然资源,其安全已成为当今最受关注的环境问题之一。近年来,随着人类社会的快速发展,不合理的人类活动导致一些区域水土流失加剧,进一步威胁水土资源安全^[1]。水土流失不仅阻碍人类发展、加剧江河湖库淤积和洪涝灾害,也是面源污染发生的重要形式和运输载体,是生态环境进一步恶化的主要助推力^[2]。水土流失的产生与自然环境及不合理的人类活动有紧密的关系,其中水土流失的自然驱动因素如降雨强度、坡度坡长、植被覆盖等与区域水土流失间的关系已经引起了相关研究者的广泛关注^[3-4]。例如基于模拟降雨试验,研究者发现区域水土流失产生频率与降雨强度呈正相关关系^[5-6];张珊珊等^[7]通过遥感影像定量分析了不同坡度等级下石漠化与水土流失之间的相关性;丛鑫等^[6]基于济南市人工径流小区试验数据,证明水土流失量与当地坡度呈正相关关系;戴金梅等^[8]研究发现植被覆盖度的增加能有效降低土壤侵蚀量。而现有的研究中对于土地利用方式、种植模式变化等人为因素与区域水土流失影响机制的研究开展较少,尤其是在我国水土流失较为典型的黄土高原地区相关研究较为匮乏。

黄土高原是我国重要的农业区^[9],其疏松易蚀的土壤特征^[10]、夏季集中的降水类型以及土地过度耕种和植被退化等原因导致区域水土流失面积居全国首位^[11]。近年来,水土流失的加剧使得黄土高原大量可耕作土壤水分及养分流失^[12],生产力下降,人地矛盾日益尖锐,水土流失问题已经成为制约黄土高原经济社会发展的最严峻的生态问题。丘陵沟壑区作为黄土高原重要的农业活动区,肩负着区域粮食生产的重任,而近年来在盲目的经济价值的追求下,土地过度开垦、种植模式落后、作物品种单一导致区域水土流失加剧、生态环境不断恶化。严峻的区域水土流失引起了相关研究者的关注,并对不同植被覆被下的黄土高原产流产沙特性开展了相应的研究。然而以往的研究多采用人工冲刷模拟试验^[13-14]对不同植被类型的水土保持效应进行研究,也有研究者探索了自然降雨下农作物的水土保持效应,但大都集中于单一作物^[15-17]或单一作物不同坡度^[18-19]及不同耕作模式下^[20-22]的水土保持效应分析,其研究结果为当地坡耕地水土保持工作提供了一定的科学指导,但对于不同降雨类型下多种农作物的产流产沙特征及水土保持效应的认知依旧较少。

本研究选取水利部乡宁县冯家沟水土保持监测站作为观测点,基于 2014—2016 年的实测降雨数据及人工径流场 5 种不同农作物措施的产流产沙量数据,分析不同农作物在不同雨型下的产流产沙特性,探索黄土丘陵沟壑区不同农作物的水土保持

效应,以期为研究区坡耕地水土保持工作提供重要的参考信息。

1 研究区概况

乡宁县冯家沟水土保持监测站(110°48′—110°47′E, 36°58′12″—35°58′N)位于乡宁县冯家沟村上游,为黄土残垣沟壑区,属黄河一级支流鄂河一级支沟。监测点涉及流域总面积 0.86 km²。该区域属典型的黄土残垣沟壑区地貌,地势西北高东南低,冲沟发育。气候属于暖温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 9.9℃,极端最高气温 36℃,最低气温 -18℃;流域内最大年降水量 732.7 mm,最小年降水量 312 mm,多年平均降水量 514 mm,年内分布极不均匀。研究区土壤以黄绵土为主,抗冲蚀性差;研究区内植被以芦草、苍耳、狗尾、苋菜、蒿草等为主。

2 试验设计与处理

2.1 试验设计

本试验通过自然降雨条件下对人工径流场泥沙、径流量监测的方式进行。径流场包括在 15°坡面上建成的 9 个长 20 m,宽 5 m,面积为 100 m²的标准人工径流小区(图 1),并对小区从 1—9 依次进行编号,其中 9 号小区为没有植被覆盖的基准径流小区,3—7 号小区为农作物覆盖措施小区,农作物种类选用黄土高原普遍种植的作物:红薯、谷子、玉米、大豆和土豆。为保证各径流区内径流互不干扰,各小区之间建 50 cm 水泥围埂,小区底部设 5 孔集(分)流桶用于收集坡面产生的径流和泥沙。农作物于每年 4 月底至 5 月初开始耕种,耕作方式为人工播种并进行定期除草,施肥措施保持一致,为 6.67 kg/hm²。



图 1 试验场设计示意图

2.2 监测方法

采用虹吸式自记雨量计记录降雨历时,根据降雨过程线计算降雨量及降雨强度;小区径流观测通过小区分(集)流桶水位,计算次降雨径流量,统计年降雨径流总量;小区土壤侵蚀泥沙量通过测定径流含沙

量,计算小区次降雨泥沙流失量,并汇总计算小区年降雨泥沙流失量,得出该小区土壤侵蚀模数。泥沙采样时,将分(集)流桶浑水充分搅匀,并将所采样品统一进行记号、量积、称重,计算出土壤流失量。

2.3 数据处理

本次研究将引发任一径流小区集流桶内产生泥沙和径流的场降水定义为侵蚀性降水^[23]。为明确侵蚀性降水特征值与不同作物措施水土保持效应的关系,选用 2014—2016 年的典型侵蚀性降水的最大 30 分钟降雨强度 I_{30} 、降雨量以及降雨历时与 5 种不同类别的作物措施的径流系数及产沙量,运用 SPSS 19.0 进行双变量相关分析。通过 K-means 聚类分析方法对侵蚀性降雨进行分类,采用经典统计方法对 5 种不同雨型下 5 种不同农作物的产流产沙量进行对比分析,并使用 Origin 8.0 作图。

3 结果与分析

3.1 不同农作物措施对次降雨产流产沙量的响应

由图 2 可知,5 种不同农作物措施径流量及土壤

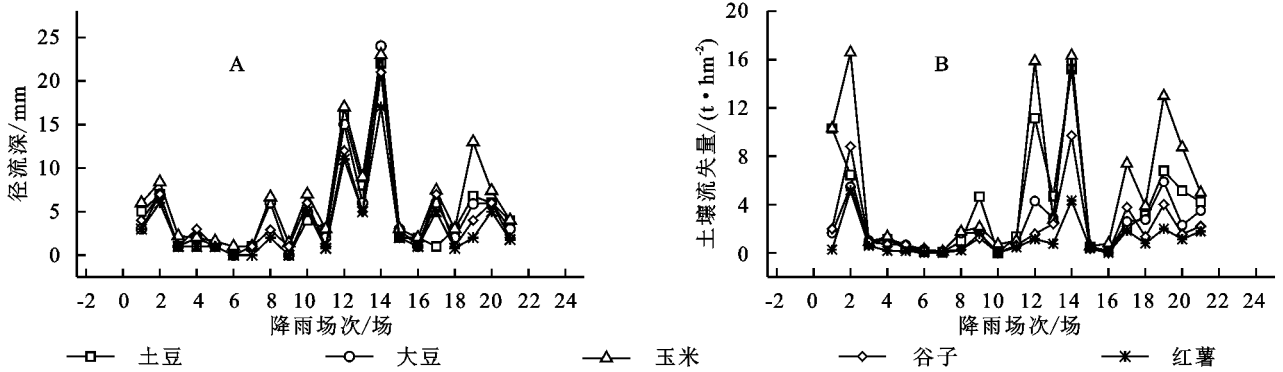


图 2 次降雨不同农作物产流产沙量

3.2 降雨特征值与不同作物小区产流产沙量的关系

水土流失最直接的原动力是降水,降水量及降水强度对水土流失量有直接影响。降雨强度越大,雨滴动能和终极速度越大,对土壤表层稳定性破坏越大,土壤冲刷量也越大^[24];当雨强不断增大时,相同降雨历时内降雨量增大,土壤透水能力下降,土壤含水率逐渐饱和,降雨变成地表径流的概率也随之上升。通过对 2014—2016 年 21 场典型侵蚀性降水的相关特征参数及相对应的产流、产沙量的系统分析发现(表 1):不同作物小区的产沙量、产流量均与最大 30 min 降雨强度(I_{30})及降雨量有相关关系,即随着降雨强度与降雨量的增大,各作物小区产流量、产沙量均增大;而产沙量、产流量与降雨历时相关性不大。对比不同的作物小区发现,红薯、土豆覆盖下的径流小区产沙量与 I_{30} 相关系数分别为 0.492,0.483,呈显著相关($p < 0.05$);谷子、大豆、玉米覆盖下的径流小区产沙量与 I_{30} 呈极显著相关($p < 0.01$),相关系数分别

流失量随降雨场次变化规律较为一致,且大体上玉米措施的产流量及土壤流失量在不同场次降雨中均最大;红薯措施与谷子措施的径流量与土壤流失量在不同场次中均较低;土豆与大豆措施径流量与土壤流失量在不同场次中差别不大。这可能与玉米措施在传统耕作中,为保证产量,株距较大,且植株覆盖度低,相比较其他植物措施减少雨滴动能的能力较弱等因素有关;而土豆与大豆植株较矮,植株枝叶扩散范围大,覆盖度有相似性,因此其产流量及土壤流失量差异较小;红薯植株属于藤蔓植物,覆盖面积较大,所以使雨滴在下落过程中减小动能,防止土壤被溅蚀。通过对比不同农作物措施随降雨场次径流量与土壤流失量变化可知,二者有相似性,即同一场降雨中,5 种不同植物措施径流量增加,其土壤流失量亦相应增加,且玉米措施在不同场次降雨中的径流量与土壤流失量均较高,红薯措施与谷子措施较低,而不同农作物措施在不同场次降雨中径流量差异较小,土壤流失量差异较大。

为:0.844,0.687,0.624。分析表明,各种植措施下的径流小区产沙量均与降雨量有关,其中红薯、谷子、玉米覆盖下的径流小区与降雨量显著相关($p < 0.05$),相关系数依次为:0.474,0.518,0.483;大豆、土豆覆盖下的径流小区产沙量与降雨量呈极显著相关($p < 0.01$),相关系数分别为:0.697,0.845。从降雨特征参数与不同作物径流量间的相关分析结果可知:谷子、红薯、大豆与 I_{30} 的相关系数依次为:0.849,0.612,0.573,在 $p < 0.01$ 条件下相关性极显著;玉米、土豆措施下的径流量与 I_{30} 在 $p < 0.05$ 条件下显著相关;除谷子外,5 种作物措施小区的径流量与降雨量均极显著相关($p < 0.01$),相关系数依次为:大豆(0.693)、土豆(0.693)、红薯(0.691)、玉米(0.660)。

3.3 不同农作物措施在不同雨型下产流产沙特性研究

3.3.1 侵蚀性降水分类 不同的作物措施由于植株地上部分(植被覆盖度、株高等)、地下部分(根形态、

根面积等)的差异^[25],加之不同类型降雨的降雨特征差异,往往导致不同农作物措施在不同雨型条件下的产流、产沙特性的差异^[26]。将研究区 21 场侵蚀性降水根据 I_{30} 、降雨量及降雨历时等因素通过聚类分析可分为Ⅰ雨型、Ⅱ雨型、Ⅲ雨型(表 2)。其中Ⅰ雨型降雨量中心值为 12.45 mm,降雨历时中心值为 650 min, I_{30} 中心值为 16.45 mm/h,降雨特征值在 3 种雨型中均居中;Ⅱ雨型降雨量中心值在 3 种雨型中最大,为 27.2 mm,降雨历时较长,中心值为 922 min,降雨强度较低, I_{30} 中心值为 7.27 mm/h;Ⅲ雨型降雨量中心值为 12.42 mm,为 3 种雨型中最小,降雨历时较短,中心值为 181.23 min,降雨强度最大, I_{30} 中心值为 18.38 mm/h。综上,研究区内Ⅰ雨型包括以降雨量及降雨历时中等、降雨强度居中为特征的 4 场降雨;Ⅱ雨型共发生频次为 3 场,以历时较长、降雨量较大、降雨强度较小为主要特征;Ⅲ雨型发生 14 场,该类型降雨历时短、降雨量较小、降雨强度较大。

3.3.2 不同农作物措施对不同类型降雨的产流产沙响应 不同雨型下不同农作物的产流产沙规律不同(图 3),分析可知:随着降雨强度增大,各农作物措施平均产流量及土壤流失量均增多;其中,雨强最大的Ⅲ雨型下 5 种不同农作物措施平均产流量及土壤流

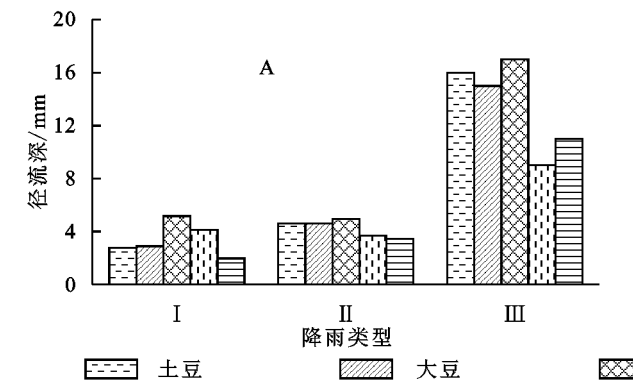


图 3 不同类型降雨条件下不同农作物措施累积径流泥沙效应

在Ⅰ雨型条件下,玉米覆盖下的径流小区平均产流量最大,为 5.171 mm;谷子措施产流量次之,为 4.12 mm;土豆措施(2.77 mm)与大豆(2.89 mm)措施产流量差别较小;红薯措施产流量为 5 种农作物措施中最少,为 1.97 mm。Ⅱ雨型条件下,玉米措施小区产流量 4.954 mm,为 5 种不同农作物措施中最大;土豆与大豆措施小区产流量均为 4.615 mm;谷子措施小区产流量为 3.692 mm;红薯措施产流量最少,为 3.642 mm。Ⅲ雨型条件下玉米措施小区产流量最大为 17 mm,土豆措施小区次之,为 15 mm;红薯措施小区产流量为 11 mm;谷子措施小区产流量最少,为 9 mm。

5 种不同农作物措施小区在不同雨型条件下的土壤流失量变化趋势与产流量变化一致,即随着降

失量最大;降雨量大、历时较长、降雨强度低的Ⅱ雨型与降雨量及降雨强度居中的Ⅰ雨型条件下各作物措施下产流量及土壤流失量差别较小。

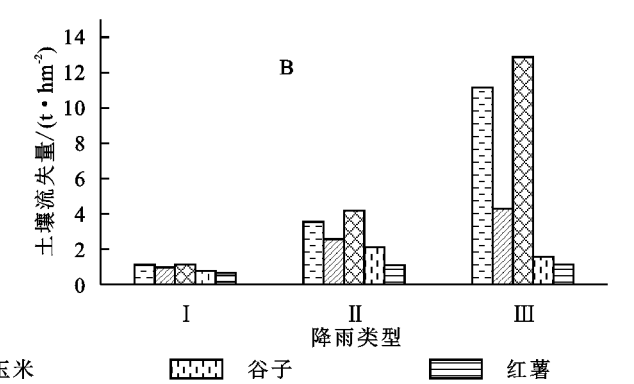
表 1 降雨特征参数与不同作物产流、产沙量的相关系数

项目	农作物种类	I_{30}	降雨量	降雨历时
产沙量	红薯	0.492*	0.474*	-0.114
	谷子	0.844**	0.518*	-0.006
	玉米	0.624**	0.483*	0.002
	大豆	0.687**	0.697**	0.103
	土豆	0.483*	0.845**	0.105
径流量	红薯	0.612**	0.691**	0.322
	谷子	0.849**	0.577*	0.033
	玉米	0.533*	0.660**	0.379
	大豆	0.573**	0.693**	0.341
	土豆	0.458*	0.693**	0.325

注:* 和 ** 分别表示相关程度达显著($p < 0.05$)和极显著($p < 0.01$)水平。

表 2 侵蚀性降水分类结果

降雨类型	频次/场	降雨量中心值/mm	降雨历时中心值/min	I_{30} 中心值/(mm·h ⁻¹)
Ⅰ	4	12.45	650	16.45
Ⅱ	3	27.20	922.0	7.27
Ⅲ	14	12.42	181.23	18.38



雨强度增加,5 种措施小区土壤流失量增加。在Ⅰ型降雨条件下,玉米措施小区的土壤流失量最大,达到 1.122 t/hm²;其次为土豆、大豆、谷子,土壤流失量分别为 1.117、0.97、0.764 t/hm²;红薯措施小区土壤流失量最小,为 0.67 t/hm²。Ⅱ雨型条件下,玉米措施小区土壤流失量最大,为 4.190 t/hm²;红薯措施小区土壤流失量最小,为 1.096 t/hm²;土豆措施小区土壤流失量(3.552 t/hm²)仅次于玉米,大豆、谷子土壤流失量分别为 2.571、2.115 t/hm²。Ⅲ雨型条件下,玉米措施小区土壤流失量最大,为 12.883 t/hm²;红薯措施小区土壤流失量最小,为 1.128 t/hm²。

综上所述,5 种不同作物覆盖小区的平均产流量与土壤流失量均与降雨强度呈正相关关系。且在 3 种不

同的降雨类型下,玉米措施小区的产流量及土壤流失量最大。除Ⅱ雨型外,红薯措施小区在不同类型降雨条件下产流量及土壤流失量均最小,说明红薯是更适用于雨强较大的降雨下的坡耕地的水土保持作物。

4 讨论

本研究基于多年自然降雨条件下分析了侵蚀性降雨特征值即 I_{30} 、降雨历时、降雨量与不同作物措施的相关性,结果表明:5 种作物产流产沙量均与 I_{30} 及次降雨量有显著或极显著相关关系,这一结果与马星^[25]、王丰^[27]、黄志霖^[18]等的研究结果一致。几种作物中谷子覆盖下的径流小区土壤流失量及径流深与 I_{30} 相关系数最大,即受雨强影响较大;土豆措施覆盖下的径流小区土壤流失量及径流深与降雨量呈极显著相关且相关系数最大,即受降雨量影响较大,各径流小区产流产沙量与降雨历时无显著的相关关系。不同的作物由于其植株形态、株高、叶面积、根系发育等具有差异导致其对不同类型侵蚀性降水响应不同^[28],其产流产沙特性亦不尽相同。在 3 种不同的降雨类型条件下红薯措施的产流产沙量最小,这可能与红薯植株属于藤蔓植物,植株较低、叶面积较大、地表覆盖率较高有关,红薯的这些生理特性能有效降低雨滴下降的速度及降水对表层土壤的溅蚀,从而阻止土壤随侵蚀性降水的流失。类似的现象在我国华中地区^[29]和湘江流域^[30]的相关研究中也得到进一步证实。

5 结论

(1) 不同场次降雨中,玉米措施产流量及土壤流失量较大,红薯措施与谷子措施最小。土豆措施与大豆措施差别不大。

(2) 不同作物小区产沙量、产流量均与最大 30 分钟降雨强度 I_{30} 及降雨量有显著和极显著相关关系,与降雨历时相关性不大。谷子措施下的径流小区产流产沙与 I_{30} 显著相关且相关系数最大;土豆措施下的径流小区产流产沙量与降雨量显著相关且相关系数最大。

(3) 5 种作物在不同雨型下产流产沙特性不同,且在雨强较大的Ⅲ雨型下各作物措施径流深最深,土壤流失量最大;红薯措施在不同雨型下产流量及土壤流失量较少,玉米措施在不同雨型下产流量及土壤流失量较大。

综上,红薯作为一种经济作物,是黄土高原丘陵沟壑区坡耕地水土流失防治的优选作物,而玉米由于植株特性及耕种方式的特点,不适于研究区内坡耕地的推广选种。

参考文献:

- [1] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等.植被与水土流失关系研究进展[J].生态学报,2006,26(9):3137-3143.
- [2] 常松果,胡雪琴,史东梅,等.不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):34-40.
- [3] 朱明勇,谭淑端,张全发.近 60 年汉江流域侵蚀性降雨的时空变化特征[J].生态环境学报,2013,22(9):1544-1549.
- [4] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].农业机械学报,2014,45(2):169-175.
- [5] 梁永哲,夏振尧,牛鹏辉,等.三峡库区小流域降雨入渗和产流产沙特征试验研究[J].长江科学院院报,2016,33(2):28-32.
- [6] 丛鑫,边振,薛春珂,等.不同坡度条件下的水土流失特征研究[J].中国农村水利水电,2017(5):124-128.
- [7] 张珊珊,周忠发,孙小涛,等.基于坡度等级的喀斯特山区石漠化与水土流失相关性研究:以贵州省盘县为例[J].水土保持学报,2017,31(2):82-89.
- [8] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):33-38.
- [9] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [10] 王兵,刘国彬,张光辉,等.黄土丘陵区中尺度流域水土流失治理环境效应评估[J].农业机械学报,2012,43(7):28-35.
- [11] 王超,甄霖,杜秉贞,等.黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析[J].中国生态农业学报,2014,22(7):850-858.
- [12] 吴昱,刘慧,杨爱峥,等.黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J].农业机械学报,2018,49(5):294-301.
- [13] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.
- [14] 李元寿,王根绪,沈永平,等.长江源区不同植被覆盖度下产流产沙效应初步研究[J].冰川冻土,2005,27(6):869-875.
- [15] 杨爱峥,魏永霞,张忠学,等.坡耕地综合治理技术模式的蓄水保土及增产效应[J].农业工程学报,2011,27(11):222-226.
- [16] 张雷,金胜利,张光全,等.双垄全膜覆盖沟播栽培对甘肃中部坡耕地水土流失和作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):113-118.
- [17] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.坡度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):69-72.
- [18] 黄志霖,傅伯杰,陈利顶.黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异[J].中国水土保持科学,2005,3(4):11-18.

[8] 王浩,贾仰文,王建华,等.人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探[J].自然资源学报,2005,20(2):157-162.

[9] 陈建国,周文浩,孙高虎.论黄河小浪底水库拦沙后期的运用及水沙调控[J].泥沙研究,2016(4):1-8.

[10] 胡春宏.我国多沙河流水库“蓄清排浑”运用方式的发展与实践.水利学报,2016,47(3):283-291.

[11] 齐璞,刘月兰,李世滢,等.黄河水沙变化与下游河道减淤措施[M].郑州:黄河水利出版社,1997.

[12] 赵业安,周文浩,费祥俊,等.黄河下游河道演变基本规律[M].郑州:黄河水利出版社,1998.

[13] 许炯心.黄河下游洪水的泥沙输移特征[J].水科学进展,2002,13(5):362-368.

[14] 钱意颖,叶青超,周文浩.黄河干流水沙变化与河床演变[M].北京:中国建材工业出版社.

[15] 许炯心.黄河下游洪水的输沙效率及其与水沙组合和河床形态的关系[J].泥沙研究,2009(4):45-50.

[16] 冉立山,王随继,范小黎,等.黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应[J].地理学报,2009,64(5):531-540.

[17] Wang S, Yan M, Yan Y, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River[J]. Quaternary International, 2012,282:66-77.

[18] 王随继,闫霞霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.

[19] Wang S, Wang Y, Ran L, et al. Climatic and anthropogenic impacts on runoff changes in the Songhua River basin over the last 56 years(1955—2010), North-eastern China[J]. Catena, 2015,127:258-269.

[20] 刘成,王兆印,隋觉义.黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析[J].水利水电科技进展,2008,28(3):1-7.

[21] 刘勤,严昌荣,张燕卿,等.近 50 年黄河流域气温和降水量变化特征分析[J].中国农业气象,2012,33(4):475-480.

[22] 常军,王永光,赵宇,等.近 50 年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(1):43-54.

[23] 李立刚,陈洪伟,李占省,等.小浪底水库泥沙淤积特性及减淤运用方式探讨[J].人民黄河,2016,38(10):40-42.



(上接第 98 页)

[12] 丘雯文,钟涨宝,原春辉,等.中国农业面源污染排放的空间差异及其动态演变[J].中国农业大学学报,2018,23(1):152-163.

[13] 杨滨键,尚杰,于法稳.农业面源污染防治的难点、问题及对策[J].中国生态农业学报,2019,27(2):236-245.

[14] 蒋倩文,刘锋,彭英湘,等.生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应[J].环境科学,2019,40(5):2194-2201.

[15] 杨林章,施卫明,薛利红,等.农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践:总体思路与“4R”治理技术[J].农业环境科学学报,2013,32(1):1-8.



(上接第 103 页)

[19] 徐勇,田均良,刘普灵,等.黄土高原坡耕地水土流失地形分异模拟[J].水土保持学报,2005,19(5):18-25.

[20] 陈光荣,张国宏,高世铭,等.粮草豆隔带种植保护性耕作对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(4):54-58.

[21] 王立,黄高宝,王生鑫,等.粮草豆隔带种植保护性耕作水土流失规律[J].水土保持学报,2012,26(2):54-57.

[22] 张晓艳,王立,黄高宝,等.道地药材保护性耕作对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2008,22(2):58-61.

[23] 顾朝军,穆兴民,孙文义,等.极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究[J].自然资源学报,2017,32(10):1755-1767.

[24] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J].生态学报,2006,26(11):3847-3853.

[25] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.

[26] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析[J].自然资源学报,2019,34(7):1405-1406.

[27] 王丰,徐佩,严坤,等.三峡库区典型农作物对降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):92-101.

[28] 高磊,饶良懿,崔飞波,等.太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):5-11.

[29] 苗全安,曹凑贵,汪金平,等.丹江口库区坡耕地不同作物对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(5):11-14.

[30] 宋江平,李忠武,刘春,等.湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J].水土保持学报,2018,32(1):32-38.