

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.001

李澳,于志静,王德富,等.黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应[J].水土保持学报,2024,38(4):95-102,113.

LI Ao, YU Zhijing, WANG Defu, et al. Response of soil and water loss to land use and precipitation changes on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 95-102, 113.

黄土高原地区水土流失对土地利用和降水变化的响应

李澳^{1,2}, 于志静^{1,2}, 王德富¹, 上官周平^{1,2}, 邓蕾^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所)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.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为阐明不同降雨类型下各土地利用类型产流产沙规律, 评估不同降雨类型下各土地利用类型的减流减沙效益。[方法] 基于黄土高原地区自然降雨条件下 31 个径流场连续 2 年(2015—2016 年)的径流量和土壤流失量监测数据, 探讨不同土地利用类型(农地、撂荒地、人工草地、自然草地、灌丛地、人工林地)的产流产沙特征, 明确不同降雨类型下各土地利用类型的减流减沙效率。[结果] 年降雨尺度下撂荒地径流量与土壤流失量最大(30 mm, 86 t/hm²), 人工林地最小(8 mm, 24 t/hm²), 其他土地利用类型无显著差异。次降雨尺度下, 通过聚类分析根据降雨历时、30 min 最大降雨强度和降雨强度将 120 场降雨分为 3 个降雨类型。降雨类型 I: 降雨历时适中(749 min), 降雨量适中(35.4 mm), 降雨强度适中(16.9 mm/h); 降雨类型 II: 降雨历时短(222 min), 降雨量适中(25.2 mm), 降雨强度大(23.8 mm/h); 降雨类型 III: 降雨历时长(1 451 min), 降雨量大(40.6 mm), 降雨强度低(11.5 mm/h), 发现径流系数在 3 种降雨类型下表现为 II > III > I, 土壤流失量表现为 II > I > III。降雨类型 I 灌丛地产生的径流系数显著高于其他土地利用类型, 达到 17.7%, 是人工林地的 2.36 倍; 降雨类型 II 下各土地利用类型径流系数无显著差异, 平均径流系数为 19.9%; 降雨类型 III 撂荒地、人工草地、自然草地与农地的径流系数(平均 14.3%)显著高于灌丛地与人工林地(平均 9.0%); 农地、人工草地、灌丛地和人工林地在降雨类型 II 产生的土壤流失量(3.94, 0.87, 1.06, 1.08 t/hm²) > 降雨类型 I (1.60, 0.60, 0.59, 0.63 t/hm²) > 降雨类型 III (0.09, 0.20, 0.06, 0.04 t/hm²)。[结论] 在黄土高原地区, 中低雨强的中长历时降雨条件下人工林地是有效控制水土流失的首选, 在短历时强降雨条件下灌丛地与草地水土保持效果较好。

关键词: 土地利用; 土壤侵蚀; 径流; 泥沙量; 水土保持; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0095-08

Response of Soil and Water Loss to Land Use and Precipitation Changes on the Loess Plateau

LI Ao^{1,2}, YU Zhijing^{1,2}, WANG Defu¹, SHANGGUAN Zhouping^{1,2}, DENG Lei^{1,2}

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

Abstract: [Objective] In order to clarify the law of sediment yield and sediment loss of different land use types under different rainfall types, and to evaluate the benefit of sediment reduction of different land use types under different rainfall types. [Methods] Based on the monitoring data of runoff and soil loss under natural rainfall conditions over 2015—2016 in 31 runoff plots located in the Loess Plateau of China the characteristics of sediment yield and loss in different land use types, including farmlands, abandoned lands, artificial grasslands, natural grasslands, shrublands and artificial forest lands were discussed. The efficiency of runoff and sediment reduction for each land use type under different rainfall types was determined.

收稿日期: 2023-12-01

修回日期: 2024-01-03

录用日期: 2024-01-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-29

资助项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2243225)

第一作者: 李澳(1999—), 男, 硕士, 主要从事植被恢复的生态效应研究。E-mail: 2021051510@nwafu.edu.cn

通信作者: 邓蕾(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要从事生态恢复与水土保持研究。E-mail: leideng@ms.iswc.ac.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

[Results] The runoff and soil loss of abandoned lands were the largest (30 mm, 86 t/hm²) and artificial forest lands were the smallest (8 mm, 24 t/hm²) under the annual rainfall scale, and there was no significant difference between other land use types. Through the application of duster analysis a total of 120 rainfall events were categorized into three distinct rainfall types based on criteria that included amount, duration, and maximum intensity of rainfall in a 30-minute period. That is, Rainfall Type I: characterised by moderate rainfall duration (749 min), moderate rainfall volume (35.4 mm), and moderate rainfall intensity (16.9 mm/h); Rainfall Type II: comprising short-duration rainfall (222 min), moderate rainfall volume (25.2 mm), and intense rainfall intensity (23.8 mm/h); Rainfall Type III: involving a long duration of rainfall (1 451 min), substantial rainfall volume (40.6 mm), but low intensity of rainfall (11.5 mm/h). When considering the impact of these types of rainfall within the given scale, the study observed the following trends, for the runoff coefficient, exhibiting Rainfall Type II > Rainfall Type III > Rainfall Type I, while for soil loss, exhibiting Rainfall Type II > Rainfall Type I > Rainfall Type III. The runoff coefficient of Rainfall Type I was significantly higher than that of other land use types, reaching 17.7%, which was 2.36 times that of artificial forest land. There were no significant difference in runoff coefficient under Rainfall Type II, and the average runoff coefficient was 19.9%. The runoff coefficient of abandoned lands, artificial grasslands, natural grasslands, and farmlands (average of 14.3%) was significantly higher than that of shrublands and artificial forest lands (averaging at 9.0%). The soil loss of famlands, artificial grasslands, shmblands and artificial forest lands under Rainfall Type II (3.94, 0.87, 1.06, 1.08 t/hm²) > Rainfall Type I (1.60, 0.60, 0.59, 0.63 t/hm²) > Rainfall Type III (0.09, 0.20, 0.06, 0.04 t/hm²). [Conclusion] In the Loess Plateau, the artificial forest land was the first choice to control soil and water loss effectively under the condition of medium-low rainfall intensity and medium-long duration rainfall, and the soil and water conservation effect of shrubland and grassland was better under short-duration heavy rainfall.

Keywords: land use; soil erosion; runoff; sediment volume; soil and water conservation; the Loess Plateau

Received: 2023-12-01

Revised: 2024-01-03

Accepted: 2024-01-20

Online(www.cnki.net): 2024-04-29

水土流失是世界上最严重的环境问题之一^[1],是造成土地退化、土地生产力损失和生态平衡破坏的主要原因^[2],其造成的危害也波及到经济、农业和社会发展的方方面面^[3]。黄土高原地区是世界上水土流失最严重的地区之一,能否解决该地区水土流失问题关乎整个黄河流域的生态安全^[4]。为了解该地区水土流失过程,缓解水土流失问题,国家推出了退耕还林(草)等生态治理工程。这些生态工程通过采用不同的土地利用措施调控土壤稳定性,提高土壤抗蚀性,有效减少了水土流失现象的发生。

由于黄土高原地区土壤侵蚀环境复杂,土地利用方式多样,降雨条件集中,导致该区域土壤侵蚀机理较为复杂。朱燕琴等^[5]对不同土地利用类型水土保持效益方面的研究表明,黄土高原草灌木及林地的减沙作用优于农地;同时 WEI 等^[6]分析了土地利用类型及降雨条件对水土流失的影响,结果表明雨强较大、历时较短的雨型>雨强中等、历时中等的雨型>雨强较小、历时较长的雨型。尽管现阶段不同降雨特征、不同土地利用类型下的产流产沙规律研究较多,

但以往多在人工模拟降雨试验下开展,部分研究基于野外径流小区,观测试验时限相对较短,需进一步开展天然降雨条件下不同土地利用类型下土壤侵蚀相关研究。另外,由于时空差异的存在不同区域之间降雨特征不同,相关研究大多集中于小尺度,如坡面、径流小区等,缺少区域尺度上的研究分析,加上不同区域之间侵蚀性降雨特征不同,植被类型多样,不同土地利用类型是否显著改善黄土高原地区水土流失现状仍需要进一步探讨。

本研究以黄土高原为研究对象,基于 2015—2016 连续 2 年自然降雨条件下不同土地利用类型(农地、撂荒地、自然草地、人工草地、灌丛地和人工林地)年降雨及次降雨尺度下的径流量和土壤流失量数据,量化不同土地利用类型下降雨量与径流量、土壤流失量之间的关系,探究不同降雨类型下径流系数与土壤流失量的差异,阐明不同降雨类型下各土地利用类型产流产沙规律,评估不同降雨模式下各土地利用类型的减流减沙效益,以为黄土高原水土流失防治提供相应的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取黄土高原(33°43′—41°16′N,100°54′—114°33′E)31 个小流域径流场(图 1),各径流场建立时间由 1985—2014 年不等,每个径流场存在明确的土地利用情况与测量周期。径流场广泛分布在 6 个省(陕西、山西、宁夏、甘肃、青海、内蒙古)和 13 个县区(安塞、神木、绥德、米脂、子洲、长武、庆阳、泾川、西峰、天水、定西、固原、准格尔旗),研究的土地利用类型包括撂荒地、人工草地、自然草地、灌丛地和人工林地(表 1)。土壤类型分别为黄绵土、黄土、白垆土、瘠土、褐土、壤土、栗钙土及风沙土。所选各径流场下垫面情况除土壤类型外基本一致(坡位、土壤厚度、面积和管理方式)。

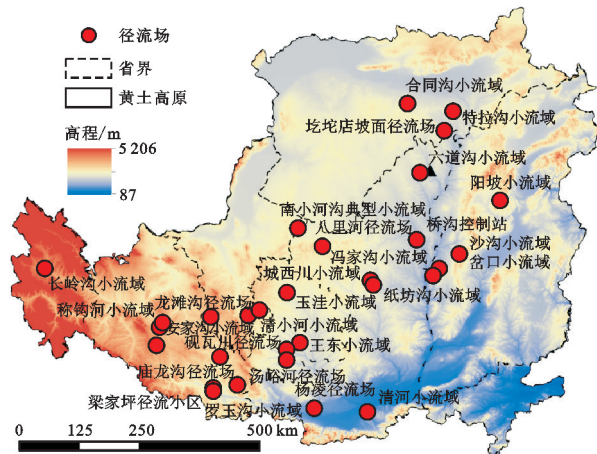


图 1 径流场位置分布

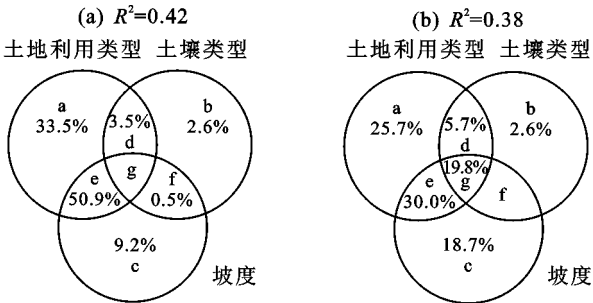
Fig. 1 Location distribution map of runoff field

表 1 黄土高原径流小区概况

Table 1 Description of land use types in runoff plots on the Loess Plateau

土地利用类型	植被	坡度/(°)	坡长/m	坡宽/m	盖度/%
农地	红薯	10~15	20	5	30~70
	马铃薯	5~15	20	5	30~70
	花生	10~25	20	5	30~70
	红薯	5~25	20	5	30~70
	小麦	5~25	20	5	30~70
撂荒地	沙棘	5~25	20	5	60~65
	柠条	10	20	5	60~65
人工草地	紫花苜蓿	25	20	5	60~65
自然草地	三叶草	5~25	20	5	60~65
	白针茅	10	20	5	60~65
灌丛地	紫穗槐	25	20	5	60~65
	冰草	25	20	5	60~65
人工林地	杏树	10~25	20	5	15~40
	油松	5~25	20	5	15~40
	侧柏	25	20	5	15~40

对不同径流场存在差异的土壤类型、坡度与土地利用类型情况进行多因素方差分析(图 2),结果表明,土地利用类型的差异解释了产生径流量差异的 33.5%,解释了土壤流失量差异的 25.7%,坡度次之,由土壤类型差异造成的水土流失的解释率最小;同时对各径流小区坡度与产流量、土壤流失量进行的相关性检验,结果表明,坡度与产流产沙量关系均不显著(表 2),故本试验主要考虑不同土地利用类型带来的水土流失差异。



注:(a)为土地利用类型、土壤类型及坡度对径流量的多因素方差分析;(b)为土地利用类型、土壤类型及坡度对土壤流失量的多因素方差分析。

图 2 土地利用类型、土壤类型及坡度对径流量及土壤流失量的多因素方差分析

Fig. 2 Multi-factor variance analysis of land use type, soil type and slope on runoff and soil loss

表 2 黄土高原不同土地利用类型的年径流量、土壤流失量与径流小区坡度之间的 Spearman 秩相关系数(r_s)和 p 值

Table 2 Spearman rank correlation coefficient (r_s) and p value of annual runoff, soil loss and slope of runoff plot in different land use types in the Loess Plateau

土地利用类型	径流量		土壤流失量	
	r_s	p	r_s	p
农地	0.12	0.55	0.20	0.29
撂荒地	0.08	0.74	0.06	0.75
人工草地	-0.61	0.10	0.24	0.57
自然草地	0.36	0.70	0.09	0.43
灌丛地	-0.72	0.61	0.17	0.21
人工林地	0.43	0.77	0.10	0.47

1.2 观测内容与方法

对收集到不同径流场的 2015—2016 年连续 2 年测定的侵蚀性降雨产流产沙资料进行分析研究。各径流小区的土地利用类型、植被、降雨场次、降雨强度、降雨历时、降雨侵蚀力、径流量和土壤流失量等数据来源于水利部水土保持监测中心(www.cnscm.org)。

本研究试验数据均来自自然降雨事件,平均降雨强度 8.3 mm/h,平均降雨历时 9.5 h,平均降雨量

31.2 mm。按照气象学雨量标准^[7]进行分级,其中产生径流的小雨(≤ 10 mm)9次,中雨(10~25 mm)57次,大雨(> 25 mm)54次,产生径流的中雨及大雨占侵蚀性降雨的93%,是黄土高原产流的主要降雨形式,与前人^[8]研究相符。通过 K-means 聚类分析根据降雨特征(降雨量、30 min 最大降雨强度、降雨历时)对记录的降雨事件进行分类,使用排列多变量方差分析(PERMANOVA, $p < 0.05$)验证聚类分析结果的一致性,并结合 PCA 分析对分类结果的合理性进行检验,将侵蚀性降雨分为3个降雨类型,分别为降雨类型I(中历时、中雨强、中雨量),其平均降雨历时749.3 min,平均降雨量35.4 mm,30 min 最大降雨强度16.9 mm/h;降雨类型II(短历时、大雨强、小雨量),其平均降雨历时222.6 min,降雨量25.2 mm,30 min 最大降雨强23.9 mm/h;降雨类型III(长历时、小雨强、大雨量),其平均降雨历时1451.8 min,降雨量40.6 mm,30 min 最大降雨强度11.5 mm/h(表3)。

表 3 降雨类型
Table 3 Statistics of rainfall types

降雨类型	降雨 次数/次	指标	降雨量/	降雨历时/	30 min 最大
			mm	min	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)
降雨类型 I	47	最大值	156.00	1 075.00	59.60
		最小值	10.40	505.00	2.20
		平均值	35.36	749.30	16.91
降雨类型 II	58	最大值	103.00	480.00	62.40
		最小值	5.00	10.00	3.20
		平均值	25.18	222.64	23.86
降雨类型 III	15	最大值	109.60	2 100.00	63.20
		最小值	13.80	1 115.00	1.60
		平均值	40.55	1 451.75	11.53

根据中心极限定理,样本平均数的标准误差与样本容量的平方根呈反比^[9]。以径流小区年的平方根作为加权因子^[10],来计算平均值。

$$R_l = \sum_{i=1}^m R_{li} \sqrt{n_{li}} / \sum_{i=1}^m \sqrt{n_{li}} \quad (1)$$

$$S_l = \sum_{i=1}^m S_{li} \sqrt{n_{li}} / \sum_{i=1}^m \sqrt{n_{li}} \quad (2)$$

式中: R_l 为不同土地利用下产生的径流量(mm); S_l 为土壤流失率量或土壤流失量(t/hm²); n_{li} 为采取不同土地利用类型的径流小区年数。

为了评估研究期间的地表径流与土壤流失量,本研究计算了径流系数、减流率和减沙率。减流率与减沙率被定义为与裸地相比,不同土地利用类型的地表径流量及土壤流失量的减少情况^[11]。按公式(1)计算径流系数(RC),按公式(2)计算减流率(RRB),按公式(3)计算减沙率(SRB)。

$$R = (SR/P) \times 100\% \quad (3)$$

$$RRB = (R_b - R_l) / R_b \times 100\% \quad (4)$$

$$SRB = (S_b - S_l) / S_b \times 100\% \quad (5)$$

式中: R 为径流系数(%); SR 、 P 分别为地表径流量(mm)和降雨量(mm); R_b 、 S_b 分别为裸地的径流系数(%)和土壤流失量(t/hm²); R_l 、 S_l 分别为不同土地利用类型的径流系数(%)和土壤流失量(t/hm²)。

1.3 数据分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Tukey's HSD 检验径流和土壤流失随土地利用类型的差异($p < 0.05$);使用 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 检验检验数据的分布正态性和方差同质性。采用 Spearman 相关分析探讨土地利用类型与径流量、土壤流失量关系,分析径流系数与土壤流失量与降雨特征值(降雨量、降雨历时、30 min 最大降雨强度和降雨侵蚀力)的相关性。所有统计分析均采用 IBM SPSS Statistics 21.0 软件进行。

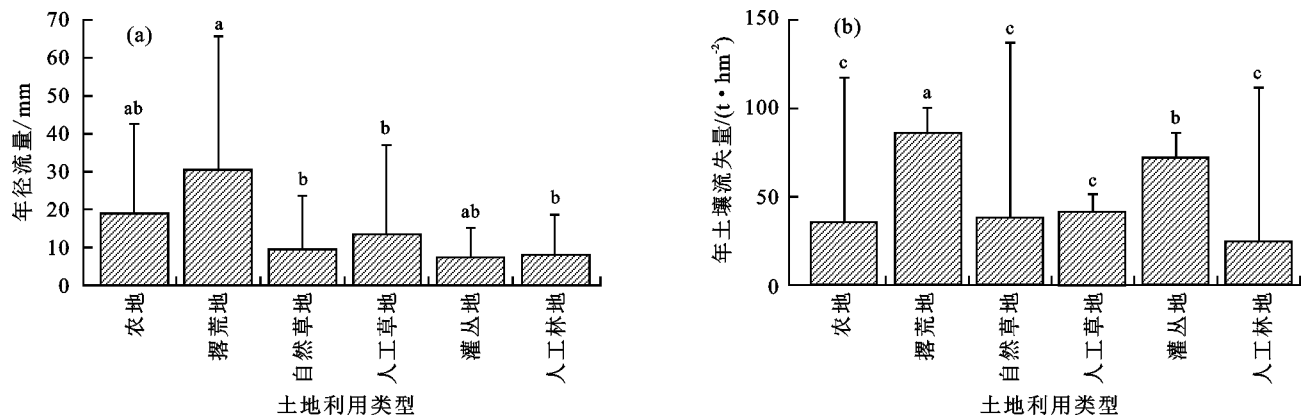
2 结果与分析

2.1 年降雨尺度下不同土地利用类型的径流量与土壤流失量的差异

通过 Tukey's HSD 进行分析,结果表明年尺度下撂荒地产生的土壤流失量(86.3 t/hm²)显著高于其他土地利用模式($p < 0.05$)(图3),灌丛地次之,其余土地利用类型无显著差异,其中人工林地土壤流失量24.3 t/hm²,仅为撂荒地的27.9%左右;年尺度下灌丛地产生的径流量最低,仅为撂荒地的23.3%。自然草地、人工草地与人工林地产生的平均径流量无显著差异,平均径流量 < 13.7 mm。

2.2 次降雨尺度下不同土地利用类型径流与土壤流失量的差异

次降雨尺度下撂荒地产生的土壤流失量(2.2 t/hm²)显著高于其他土地利用类型,而农地、自然草地、人工草地与灌丛地土壤流失量无显著差异,平均土壤流失量保持在0.96 t/hm²。人工林地的土壤流失量(0.14 t/hm²)显著低于其他土地利用类型(图4)。不同降雨类型下各土地利用类型产生的径流系数和土壤流失量均表现出显著差异(图5)。除灌丛地以外,其他土地利用类型的产流量表现为II>III>I。在降雨类型I下灌丛地径流系数最大(17.7%),人工林地径流系数仅为灌丛地的42.5%;在降雨类型II下人工草地具有最小的径流系数(15.7%),撂荒地是其1.56倍。降雨类型III下撂荒地、人工草地、自然草地、灌丛地与农地的径流系数高于人工林地。农地、人工草地、灌丛地和人工林地产生的土壤流失量在3种降雨类型下表现为II>I>III,而撂荒地与自然草地的土壤流失量在3种降雨类型下则表现为I>II>III。



注:图柱上方不同小写字母表示不同土地利用类型间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图3 不同土地利用类型年径流量及土壤流失量

Fig. 3 Annual runoff and soil loss of different land use types

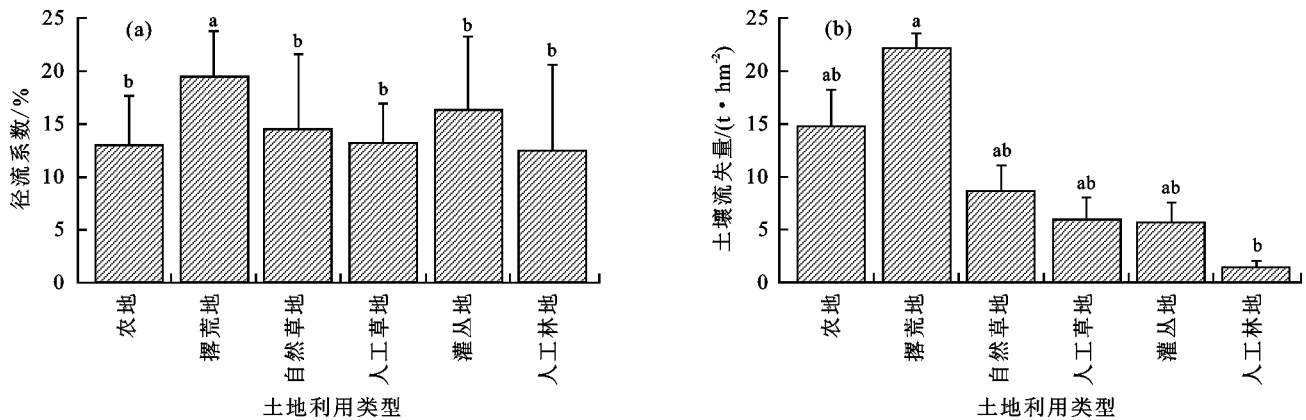
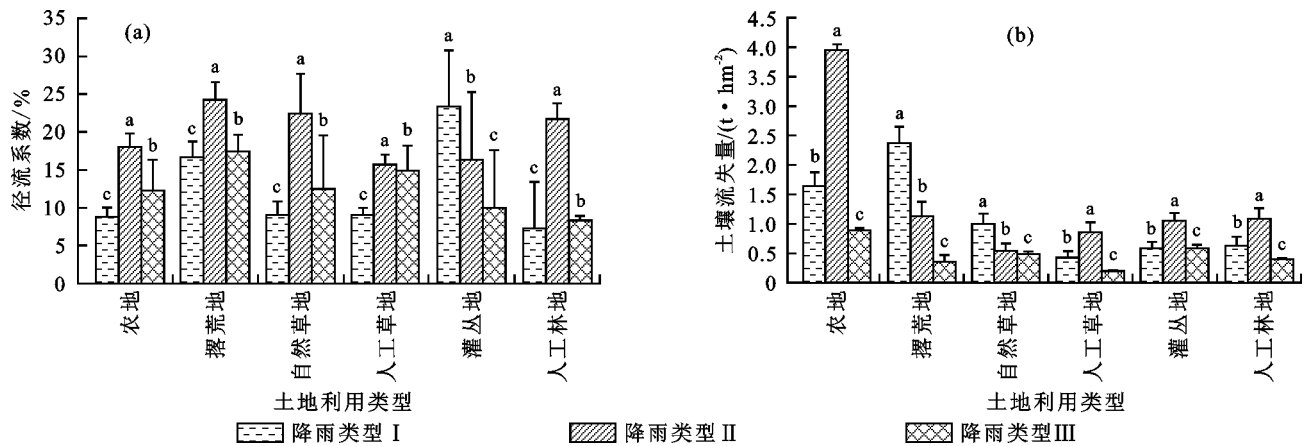


图4 次降雨尺度下不同土地利用类型的径流系数与土壤流失量

Fig. 4 Runoff coefficient and soil loss of different land use types under rainfall scale



注:图柱上方不同小写字母表示不同降雨类型间差异显著($p < 0.05$)。

图5 次降雨尺度下不同土地利用类型在不同降雨类型下的径流系数与土壤流失量

Fig. 5 Runoff coefficient and soil loss of different land use types under different rainfall scales

2.3 次降雨条件下不同土地利用类型的减流减沙效益

在不同降雨类型下各土地利用类型减流率差异较大,在降雨类型Ⅰ下除灌丛地、撂荒地外其他土地利用类型减流率均达到60.0%以上,其中人工林地减流率最高,达到68.9%,灌丛地最低,减流率仅为平均值的44.2%;降雨类型Ⅱ下人工草地减流率最高,是撂荒地的5倍以上,而人工林地在降雨类型Ⅱ的减流

率仅为降雨类型Ⅰ的36.0%左右;在降雨类型Ⅲ下除撂荒地外其他土地利用类型减流率均超过20.0%,其中人工林地均有最高的减流率,达到56.1%(表4)。与之相反,各土地利用类型在不同降雨类型下均保持较高的减沙率,减沙率达到50.0%以上。其中人工林地与灌丛地在降雨类型Ⅰ、Ⅲ下平均减沙率在90.0%以上;在降雨模式Ⅲ下人工草地减沙率为自然草地的

84.9%, 撂荒地 在降雨类型Ⅲ下表现出较差的减沙率, 仅为平均值的 65.9%。在降雨模式Ⅱ下自然草地及人工草地拥有较高的水土保持效果。总体而言, 在降雨类型Ⅰ、Ⅲ下人工林地具有最好的水土保持效果, 在降雨类型Ⅱ下草地具有最好的水土保持效果, 除农地外减沙率均达到 80% 以上。

表 4 不同降雨类型下的减流率与减沙率

Table 4 Runoff coefficient and soil loss reduction rate and sediment reduction rate under different rainfall types %						
土地利用类型	降雨类型Ⅰ		降雨类型Ⅱ		降雨类型Ⅲ	
	减流率	减沙率	减流率	减沙率	减流率	减沙率
农地	61.7	82.9	37.5	56.5	36.1	87.9
撂荒地	28.4	75.4	15.5	87.5	7.9	54.5
自然草地	61.7	90.7	82.4	93.9	34.2	93.3
人工草地	61.9	93.5	84.2	90.4	21.1	73.2
灌丛地	27.0	94.0	44.2	88.3	48.9	92.0
人工林地	68.9	95.6	54.5	88.0	56.1	94.6

2.4 侵蚀变量与降雨参数间的关系

径流系数、土壤流失量与降雨历时之间大多数相关性不显著(表 5)。径流系数在不同的降雨类型下与降雨历时均呈负相关关系。在降雨类型Ⅱ下土壤流失量与降雨历时呈负相关关系($p<0.05$)。总体而言, 不同降雨类型下平均雨强与 I_{30} 和土壤流失量呈正相关关系($p<0.05$), 降雨类型Ⅰ、Ⅱ下平均雨强与

I_{30} 和径流系数、土壤流失量呈显著正相关关系, 在降雨类型Ⅲ下平均雨强与 I_{30} 与土壤流失量呈显著正相关。在降雨类型Ⅰ和Ⅱ下径流系数与 I_{30} 呈显著正相关关系($p<0.05$), 同时各降雨类型下土壤流失量与降雨侵蚀力均呈显著正相关关系($p<0.05$)。这些结果表明平均雨强和 I_{30} 是影响侵蚀变量的主要降雨因素。

表 5 径流系数和土壤流失量与降雨参数的相关性

Table 5 Correlation between runoff coefficient and soil loss and rainfall parameters						
项目	降雨类型	降雨历时	降雨量	平均雨强	I_{30}	降雨侵蚀力
径流系数	降雨类型Ⅰ	-0.43	0.17**	0.14*	0.33**	0.19**
	降雨类型Ⅱ	-0.40	-0.04	0.39**	0.26**	0.08
	降雨类型Ⅲ	-0.08	-0.04	0.15	0.19	0.15
	降雨类型Ⅰ	-0.10	0.11*	0.43**	0.60**	0.10*
土壤流失量	降雨类型Ⅱ	-0.16**	0.23**	0.27**	0.44**	0.34**
	降雨类型Ⅲ	-0.04	0.50**	0.57**	0.73**	0.70**

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论

3.1 降雨类型对径流和土壤流失的影响

本研究中 3 个降雨类型的平均降雨历时分别为 749, 222, 1 451 min, 部分侵蚀性降雨持续时间超过 1 天。所划分的 3 个不同降雨类型中, 降雨类型Ⅱ在总降水事件中占比 1/2 左右, 是黄土高原最普遍的降雨类型, 其产生的径流系数及土壤流失量显著高于其他降雨类型, 表明降雨类型Ⅱ是研究区域内最具有破坏性的降雨类型。降雨类型Ⅱ在短时间内的强降水容易形成细沟侵蚀, 同时强降雨产生的降雨击溅侵蚀造成大量土壤流失量的产生。降雨类型Ⅰ和降雨类型Ⅲ 2 个降雨类型下径流系数及土壤流失量显著低于降雨类型Ⅱ, 这因为半干旱地区径流和土壤流失量多由短时间高强度的降雨事件引发。与降雨类型Ⅰ、Ⅱ相比, 降雨类型Ⅲ降雨强度低, 持续时间长, 土壤一直保持较高的渗透性, 积水可以及时入渗从而减少地表径流的形成, 因而产生的径流系数与土壤流失量最

低。因此, 在研究土壤侵蚀对降雨的响应时, 降雨历时和降雨强度是必须要考虑的影响因素。

3.2 不同降雨类型下不同土地利用类型对水土流失的影响

本研究针对不同土地利用类型(农地、人工草地、自然草地、撂荒地、灌丛地、人工林地)分析径流系数与土壤流失量对降雨类型的响应, 可以看出降雨类型、土地利用类型、径流量与土壤流失量之间存在显著的相互关系(表 6)。同一土地利用类型产生的径流系数在不同降雨类型下差异显著, 呈现出降雨类型Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ, 这表明除土地利用类型之外, 降雨对地表径流的产生也存在显著影响。先前模拟试验^[12]表明, 降雨强度大、持续时间短的降雨类型(降雨类型Ⅱ)下土壤侵蚀量高于降雨强度低、持续时间长的降雨类型(降雨类型Ⅰ、Ⅲ)。尤其是在黄土高原地区, 高强度和短历时的降雨事件雨滴动能可达普通降雨强度下的数倍, 产生更高的土壤侵蚀; 而低降雨强度

长历时降雨事件使土壤具有更高的水分入渗,从而减少地表径流量^[13]。

表 6 降雨类型和土地利用类型与径流系数和土壤流失量关系
Table 6 Rrlationship between rainfall type and land use type and runoff coefficient and soil loss

指标	径流系数		土壤流失量	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
降雨类型	12.53	<0.001	1.08	<0.001
土地利用类型	2.45	<0.001	4.79	<0.001
土地利用类型×降雨类型	3.21	<0.001	2.65	<0.001

相比撂荒地与农地,具有植被覆盖的土地利用类型受到的土壤侵蚀程度较小^[14]。已有研究^[15]表明,植被覆盖率越大,地表径流越少。本研究中次降雨条件下土壤表面具有植被覆盖的土地利用类型(自然草地、人工草地、灌丛地和人工林地)产生的径流系数显著低于没有植被覆盖的撂荒地,究其原因植物群落能够固结土壤,增强土壤结构稳定性。此外,植被群落的枯枝落叶层的拦蓄作用减缓降雨的击溅侵蚀与径流冲刷,以及植物根系对土壤结构的改良作用^[16-17],有效减少降雨产生的径流量与土壤流失量^[18]。人工林地在降雨模式 I、Ⅲ下相对其他植被模式具有更低的径流系数,但在降雨类型 II 下,人工林地产生的径流系数高于人工草地和灌丛地,这种差异可能由于降雨类型 II 下次降雨量较少,不足以形成林下植被形成林灌草复合结构,高大的林冠层拦截汇流反而增大降雨动能,加剧对表层土壤的侵蚀,无法有效做到防治土壤侵蚀^[19]。

土地利用类型的差异显著影响土壤流失量的产生^[20-21]。本研究表明,各植被恢复类型(自然草地、人工草地、灌丛地和人工林地)产生的平均土壤流失量显著低于农地与撂荒地,是减少土壤流失的有效手段。本研究中自然草地、人工草地、灌丛地与人工林地在降雨类型 I 下产生的土壤流失量远低于农地和撂荒地;人工草地、灌丛地与人工林地则在降雨类型 II 下产生最大的土壤流失量;而在降雨类型 II 与降雨类型 III 下,不同土地利用类型下产生的土壤流失量无显著差异。这表明在不同的降雨类型下应采取不同的土地利用模式,以最大限度发挥水土保持效益^[22]。本研究中尽管撂荒地是保护生物多样性的土地利用类型,能通过自然演替恢复自身功能,但由于缺乏合理的抚育管理,产生的土壤流失量较高,有时甚至产生超过农地的土壤侵蚀量,这表明撂荒地并非总是适应该地气候条件的水土保持模式。本研究中人工草地主要物种为紫花苜蓿,相比于自然草地的白针茅具有更高的土壤分离能力,在次降雨量最低的降雨类型 II 中产生更大的土壤流失量。

3.3 不同土地类型径流和土壤流失的关系

在 3 种降雨类型下,不同土地利用类型径流系数与土壤流失量之间存在正相关关系,土壤流失量随径流系数的增大而增大,可以用一次函数($y=ax+b$)描述(表 7),系数 a 可以用来揭示土壤对径流侵蚀的敏感性。拟合结果显示,降雨类型 I 和降雨类型 III 的土壤流失量随径流系数的增长率低于降雨类型 II,这表明降雨类型 II 下土壤对径流的敏感性最高。同时在降雨类型 II 下,不同土地利用类型下土壤流失量随径流系数的变化规律存在明显差异。在降雨类型 I 下,自然草地、人工草地由于缺少林冠层,凋落物厚度及拦蓄水能力低下,产生的土壤流失量随径流系数的增长显著高于人工林地^[23]。农地水土保持效果低于其他土地利用类型可能由于人为翻耕等农业措施使得地表土壤结构疏松,抗蚀性减弱,使得土壤流失更加敏感^[24]。在降雨类型 III 下,不同土地利用类型对产生的径流及土壤流失量影响较小,地表径流和土壤流失量主要受降雨特征值的影响而非土地利用类型的变化。

表 7 不同降雨类型下各土地利用类型径流系数与土壤流失量回归分析

Table 7 Regression analysis of runoff coefficient and soil loss of each land use type under different rainfall types

土地利用类型	降雨类型	回归方程	<i>R</i> ²	<i>p</i>	样本量
农地	I	$y=-0.67+0.24x$	0.60	<0.05	58
	II	$y=0.46+0.06x$	0.89	<0.05	64
	III	$y=0.02+0.01x$	0.74	<0.05	8
撂荒地	I	$y=0.51+0.27x$	0.31	<0.05	85
	II	$y=0.72+0.15x$	0.15	<0.05	82
	III	$y=0.92+0.01x$	0.10	<0.05	26
人工草地	I	$y=-1.10+0.23x$	0.86	<0.05	41
	II	$y=-0.74+0.18x$	0.20	<0.05	42
	III	$y=-0.94+0.10x$	0.25	<0.05	10
自然草地	I	$y=-52.70+9.83x$	0.95	<0.05	49
	II	$y=-35.54+4.51x$	0.86	<0.05	35
	III	$y=-0.11+0.68x$	0.63	<0.05	8
灌丛地	I	$y=0.64+0.05x$	0.16	<0.05	25
	II	$y=0.40+0.04x$	0.14	<0.05	10
	III	$y=0.19+0.01x$	0.10	<0.05	11
人工林地	I	$y=-0.15+0.07x$	0.15	<0.05	104
	II	$y=0.05+0.04x$	0.23	<0.05	70
	III	$y=0.18+0.01x$	0.64	<0.05	23

注: x 为径流系数(%); y 为土壤流失量(t/hm^2)。

4 结 论

(1)黄土高原年降雨尺度下人工林地产生的土壤流失量最少,撂荒地最多,灌丛地土壤流失的防治效

果高于农地和撂荒地;次降雨尺度下,撂荒地降雨类型 I 下产生的土壤流失量最多,人工林地最少,其他土地利用类型无显著差异。

(2)在短历时强降雨条件的降雨类型 II 下观测到的径流系数与土壤流失量最大,是研究区域内最具有破坏性的降雨类型。

(3)降雨类型 I 下人工林地水土保持效果最好,具有最高的减流率(68.9%)与减沙率(95.6%);降雨类型 II 下草地是最适宜的土地利用类型,减流率及减沙率达到 84.2%,93.9%;降雨类型 III 下人工林地在控制水土流失方面表现最好,减流率与减沙率分别为 56.1%,94.6%。

(4)林地在研究区内超过 1/2 的降雨事件中具有较好的水土保持效益,撂荒地不同降雨类型下水土保持效果均最差,其他土地利用类型水土保持效果差异不大。因此,在黄土高原地区生态恢复中可以采取人工林地作为合理的土地利用类型。

参考文献:

- [1] FU B J, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [2] GARCÍA-RUIZ J M, BEGUERÍA S, NADAL-ROMERO E, et al. A meta-analysis of soil erosion rates across the world[J]. *Geomorphology*, 2015, 239: 160-173.
- [3] 郭达,宋小宁,董震,等.基于 RUSLE 与 GIS 的黄土高原水土流失评价研究:以宁夏中卫地区为例[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(5): 55-60.
GUO D, SONG X N, DONG Z, et al. Study on soil erosion of the NingxiaZhongwei area in the Loess Plateau based on RUSLE and GIS[J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(5): 55-60.
- [4] 胡春宏,张双虎,张晓明.新形势下黄河水沙调控策略研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 122-130.
HU C H, ZHANG S H, ZHANG X M. Research on water and sediment regulation of the Yellow River under new situation[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 122-130.
- [5] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(1): 28-34.
ZHU Y Q, ZHAO Z B, QI G P, et al. Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation types under individual rainfall events in loess hilly and Gully Region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 28-34.
- [6] WEI W, CHEN L D, FU B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3/4): 247-258.
- [7] 中国气象局.GB/T 28592—2012 降雨量等级[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2012.
China Meteorological Administration. GB/T 28592—2012 Grade of precipitation[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2012.
- [8] TANG G A, SONG X D, LI F Y, et al. Slope spectrum critical area and its spatial variation in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(12): 1452-1466.
- [9] GUO Q K, HAO Y F, LIU B Y. Rates of soil erosion in China: A study based on runoff plot data[J]. *Catena*, 2015, 124: 68-76.
- [10] 赵元,张伟,胡培雷,等.桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(21): 8535-8544.
ZHAO Y, ZHANG W, HU P L, et al. Responses of soil organic carbon fractions to different vegetation restoration in a typical Karst depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(21): 8535-8544.
- [11] ANACHE J A A, WENDLAND E C, OLIVEIRA P T S, et al. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience[J]. *Catena*, 2017, 152: 29-39.
- [12] YANG K J, LU C H. Evaluation of land-use change effects on runoff and soil erosion of a hilly basin: The Yanhe River in the Chinese Loess Plateau[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(4): 1211-1221.
- [13] 肖培青,王玲玲,杨吉山,等.大暴雨作用下黄土高原典型流域水土保持措施减沙效益研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1149-1156.
XIAO P Q, WANG L L, YANG J S, et al. Study on sediment reduction benefits of soil and water conservation measures in typical watersheds in the Loess Plateau under the heavy rainfall[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1149-1156.
- [14] ABDO H G. Impacts of war in Syria on vegetation dynamics and erosion risks in Safita area, Tartous, Syria [J]. *Regional Environmental Change*, 2018, 18(6): 1707-1719.
- [15] WOODS S W, BALFOUR V N. The effects of soil texture and ash thickness on the post-fire hydrological response from ash-covered soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(3): 274-286.
- [16] LIU Y F, LIU Y, SHI Z H, et al. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau [J]. *Catena*, 2020, 195: e104787.

- [31] RODRIGO-COMINO J, GARCÍA-DÍAZ A, BREVIK E C, et al. Role of rock fragment cover on runoff generation and sediment yield in tilled vineyards[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(6): 864-872.
- [32] 李瑞, 袁江. 区域尺度喀斯特区石漠化强度对土壤流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(15): 84-92.
- LI R, YUAN J. Influence of rocky desertification intensity of Karst areas on soil loss at a regional scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(15): 84-92.
- [33] POESEN J W, TORRI D, BUNTE K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: A review[J]. *Catena*, 1994, 23(1): 141-166.
- [34] PRATS S, ABRANTES J, COELHO C, et al. Comparing topsoil charcoal, ash, and stone cover effects on the postfire hydrologic and erosive response under laboratory conditions[J]. *Land Degradation and Development*, 2018, 29(7): 2102-2111.
- [35] WANG X Y, LI Z X, CAI C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. *Geomorphology*, 2012, S151/S152: 234-242.
- [36] 彭旭东, 戴全厚, 袁应飞, 等. 喀斯特坡耕地裸坡侵蚀性降雨产流试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(6): 1211-1224.
- PENG X D, DAI Q H, YUAN Y F, et al. Experimental study on runoff yield in erosive rainfalls on bare slope farmland in Karst Regions[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(6): 1211-1224.
- [37] WANG R, LI P, LI Z B, et al. Effects of gully head height and soil texture on gully headcut erosion in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 207: e105674.
- [38] 董晓宇. 裸露砒砂岩区土壤—基岩复合坡面水分运移过程及侵蚀特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- DONG X Y. Study on water transfer process and erosion characteristics of soil-bedrock composite slope in bare Pisha Sandstone Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [39] XIA L, SONG X Y, FU N, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological processes under rainfall simulation in a semi-arid region of China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(6): 792-804.
- [40] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 395-402.
- ZHANG G H. Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulics[J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 395-402.
- [41] ELLISON W D. Studies of raindrop erosion[J]. *Agricultural Engineering*, 1944, 25: 131-136.
- [42] JIANG J, LIU D D, FEI Y H, et al. Combined effects of moss colonization and rock fragment coverage on sediment losses, flow hydraulics and surface microtopography of carbonate-derived laterite from Karst mountainous lands[J]. *Catena*, 2023, 229: e107202.
- [43] 彭旭东, 戴全厚, 杨智, 等. 喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- PENG X D, DAI Q H, YANG Z, et al. Sediment yield of surface and underground erosion in the process of rocky desertification of Karst area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- (上接第 102 页)
- [17] WU G L, LIU Y F, CUI Z, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(5): 875-885.
- [18] HOU J, WANG H Q, FU B J, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns[J]. *Catena*, 2016, 147: 632-637.
- [19] SUN W Y, SHAO Q Q, LIU J Y. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(6): 1091-1106.
- [20] HU J, LU Y H, FU B J, et al. Quantifying the effect of ecological restoration on runoff and sediment yields: A meta-analysis for the Loess Plateau of China[J]. *Progress in Physical Geography Earth and Environment*, 2017, 41(6): 753-774.
- [21] DENG L, KIM D G, LI M Y, et al. Land-use changes driven by 'Grain for Green' program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 177: 101-115.
- [22] CHEN Y P, WANG K B, LIN Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 739-741.
- [23] 张琳卿, 覃莉, 刘忠仙, 等. 黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 15-21, 30.
- ZHANG L Q, QIN L, LIU Z X, et al. Effects of slope planting measures on soil moisture, runoff, and sediment yield in Karst area of central Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(3): 15-21, 30.
- [24] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平. 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 9-16.
- ZHU Y Q, ZHAO Z B, QI G P. Effects of vegetation types and rainfall regimes on slope erosion and sediment yield in loess hilly and Gully Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 9-16.