不同种植模式对干热河谷坡耕地水土流失的影响

张斌艳[1,2,3]，何光熊[1,2,3]，王艳丹[1,2,3]，杨淏舟[1,2,3]，
余建琳[1,2,3]，冷 鹏[4]，方海东[1,2,3]，史亮涛[1,2,3]，冉 林[5]

(1.云南省农业科学院热区生态农业研究所，云南 元谋 651300；2.云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室，云南 元谋 651300；3.云南元谋金雷国家水土保持科技示范园，云南 元谋 651300；4.云南省水土保持生态环境监测总站，云南 昆明 650000；5.元谋县水土保持生态环境监测站，云南 元谋 651300)

摘　要：[目的] 探究干热河谷区不同种植模式坡耕地的径流分配及水土保持效益，为金沙江干热河谷水土保持型经果林营建提供科学依据。[方法] 采用原位径流小区监测试验，选取干热河谷坡耕地典型经果林经营的 2 种种植模式：单作(葡萄、枣树、柱花草)和果草复合间作(葡萄＋柱花草、枣树＋柱花草)为研究对象，设裸地为对照，比较不同作物和种植模式下小区地表径流、壤中流及土壤侵蚀量的差异，探究不同种植模式的径流分配机理，评价不同种植模式的水土保持效益。[结果] 干热河谷不同种植模式和裸地径流均以地表径流为主(53.20%～94.07%)，降雨量、降雨强度和植被覆盖是影响干热河谷区坡耕地土壤侵蚀的关键因素，不同种植模式通过调控径流在深土层的分配从而显著减少地表径流(50.79%～89.70%)和径流泥沙量(54.66%～77.13%)；果草复合的间作模式 50 cm 和 100 cm 壤中流均高于其他模式，果草复合间作模式(枣树＋柱花草、葡萄＋柱花草)的减流(78.53%，72.54%)、减沙(71.76%，63.21%)效益显著高于单作模式。[结论] 果草复合的间作模式通过将表层径流导入土壤深层的机制实现降雨径流的再分配，从而发挥更佳的水土保持功能。

关键词：种植模式；降雨特征；径流分配；壤中流；土壤流失量

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0049-09　　**中图分类号：**S157.1

文献参数：张斌艳，何光熊，王艳丹，等.不同种植模式对干热河谷坡耕地水土流失的影响[J].水土保持通报，2025，45(1)：49-57. Zhang Binyan, He Guangxiong, Wang Yandan, et al. Effects of different planting patterns on soil and water loss of sloping cropland in dry-hot valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 49-57. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.006; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.006.

Effects of different planting patterns on soil and water loss of sloping cropland in dry-hot valley

Zhang Binyan[1,2,3], He Guangxiong[1,2,3], Wang Yandan[1,2,3], Yang Haozhou[1,2,3], Yu Jianlin[1,2,3], Leng Peng[4], Fang Haidong[1,2,3], Shi Liangtao[1,2,3], Ran Lin[5]

(1.*Tropical Eco-agriculture Research Insititute*, *Yunnan Academy of Agricultural Sciences*, *Yuanmou*, *Yunnan* 651300, *China*; 2.*Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development*, *Yuanmou*, *Yunnan* 651300, *China*; 3.*Yunnan Yuanmou Jinlei Water and Soil Conservation Science and Technology Demonstration Garden*, *Yuanmou*, *Yunnanv* 651300, *China*; 4.*Ynunan Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Station*, *Kunming*, *Yunnan* 650000, *China*; 5.*Yuanmou Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Station*, *Yuanmou*, *Yunnan* 651300, *China*)

Abstract: [Objective] The runoff distribution and soil-water conservation benefits of slope croplands with different planting patterns in dry-hot valleys were analyzed in order to provide a scientific basis for the construction of soil and water conservation orchards in the Jinsha River dry-hot valley. [Methods] An in-situ runoff plot monitoring was used, and two typical planting patterns of fruit trees in dry-hot valley slope

收稿日期：2024-08-01　　**修回日期：**2024-10-05　　**采用日期：**2024-10-08

资助项目：云南大学，云南省水土流失与绿色发展重点实验室项目“云南省水土流失防治技术研发”(202205AK070026-01)；云南省科学技术厅，云南省创新引导与科技型企业培育计划“建设元谋乡村振兴科技创新县”项目(202304BT090025-04)；云南省林业和草原局，金沙江干热河谷植被生态站监测项目(2025-YN-18)；农业部，国家产业技术体系“极端高温干旱区麻类作物水土保持效应评价试验”项目(CARS-16-E6)

第一作者：张斌艳(1996—)，女(汉族)，云南省曲靖市人，硕士，研究实习员，主要从事水土保持研究。Email：zhangbinyan@swfu.edu.cn。

通信作者：方海东(1979—)，男(汉族)，黑龙江省海伦市人，硕士，研究员，主要从事干热区生态治理与农业可持续发展研究。Email：rqsfhd@163.com。

cropland were selected for the study: monoculture (grapes, dates, and stylosanthes) and fruit-grass intercropping (grapes + stylosanthes, dates + stylosanthes); the bare land was used as a control. The differences in surface runoff, subsurface flow, and soil erosion between different crops and planting patterns were compared to explore the runoff allocation mechanism and evaluate the soil and water conservation benefits on different planting patterns. [Results] Surface runoff was dominant in dry-hot valleys under different cropping patterns, and bare land runoff(53.2%—94.07%), rainfall amount, rainfall intensity, and vegetation coverage were the key factors affecting soil erosion in the dry-hot valley slope cropland. Different planting patterns regulated the distribution of runoff in the deep soil layers to significantly reduce surface runoff (50.79%—89.70%) and sediment runoff (54.66%—77.13%). The 50 cm and 100 cm interflows of the fruit-grass intercropping pattern were higher than those of the other patterns. The runoff reduction (78.53%, 72.54%) and sediment reduction (71.76%, 63.21%) benefits of the fruit-grass intercropping pattern (dates+stylosanthes, grapes+stylosanthes) were significantly higher than those of the monoculture pattern. [Conclusion] The fruit-grass composite intercropping system redistributes rainfall runoff by directing surface runoff into deep soil, thus providing better benefits for soil and water conservation.

Keywords: planting patterns; characteristics of rainfall; runoff distribution; interflow; soil loss

受山地环境制约,坡耕地在中国农业经济建设中占有重要地位,由此引发的坡耕地土壤侵蚀问题受到广泛的社会关注。当前,筛选构建适宜的作物种植模式成为应对坡耕地土壤侵蚀的重要环节。作物种植模式通过影响坡面植被生长状态、植被覆盖度以及地表土壤性质、地表粗糙度,从而增加坡耕地的拦蓄能力和抗侵蚀能力,减少水土流失[1-2]。一般而言,单一作物种植坡面侵蚀量要大于间作或轮作模式[3-4],轮作、间作、套作等多种种植方式均可以增加地面粗糙度,提高地表覆盖度,有效降低坡面产流产沙量[5-6]。大量研究表明,复合间作种植模式(粮菜间作、果草间作和粮果间作等)[7-9]既能提高土壤水分、养分利用率,提高作物产量,又能有效减少土壤养分流失,防止土壤侵蚀。坡耕地水土流失将会带来一系列的生态问题,如土地退化、生产力下降、土壤养分和水资源利用率降低。探明径流(地表径流和壤中流)在坡面的分配对于研究水土流失、土地退化过程有着不容忽视的作用[10-13]。当前,国内外不同种植模式对水土流失影响方面已经开展了大量研究[14-16],研究方向多集中在不同种植模式对土壤入渗性能、土壤养分流失、耗水特征的影响[17-19],对于干热河谷地区的水土流失研究主要集中在剑麻、番麻和草本植物群落等自然植被覆盖上的原始坡地[20-21]和不同种植模式对土壤理化性质和质量的影响上[22-23],对于不同种植模式下(单作和间作)坡耕地径流分配和水土流失机理还鲜有报道,亟需开展研究。

元谋干热河谷区是中国典型的生态脆弱区,由于当地气候炎热干旱,植被覆盖度低,且高温期长,降雨集中,加之土壤特性等原因造成了当地水土流失极为严重[24],成为金沙江中下游水土流失治理的重点区域。同时,由于元谋干热河谷区光热资源丰富,太阳辐射足,昼夜温差大,非常适宜果蔬种植,是全国重要的露天冬早蔬果产地,其中葡萄和枣树的作为代表性高附加值水果,在元谋坡耕地大面积推广种植,取得良好的经济价值。但传统的葡萄和枣树树种植行间地表裸露,存在水土流失现象,亟需探明果树行间间作能否发挥良好的水土保持功能,为当地典型经果水土保持型作物种植模式的筛选、评价及应用提供支撑。为此,本研究选择干热河谷区典型经果林经营的2种种植模式为研究对象,设置裸地作为对照,比较不同种植模式下径流小区地表径流、壤中流及土壤侵蚀量的差异,探明不同种植模式的径流分配机理和影响干热河谷坡耕地产流产沙的关键因素,评价不同种植模式的水土保持效应,为干热河谷地区的水土保持型经果林营建提供理论依据。

1 研究区概况

以金沙江干热河谷的典型代表区云南元谋为研究区,该区为南亚热带季风气候,具有“炎热干燥、降雨集中、干湿季分明”的气候特征。年均气温21.9 ℃,年均降水量为615.1 mm,且主要集中在6—10月,3—5月为全年最干、最热时期,年蒸发量高达3 911.2 mm,为年降水量的6.4倍,年干燥度为2.8。光热资源丰富,无霜期350~365 d,年日照时数2 550~2 744 h,>10 ℃年积温达8 000 ℃。自然植被方面为稀树灌草丛,以禾草为主,乔木稀少,自然植被覆盖率仅为15%~20%。土壤以燥红土与变性土为主,土壤酸性强,质地黏重,干季板结、坚硬,具有“结构松散、胶结度差、易侵蚀”等特征,特殊的气候条件和岩土性质,使得该区域水土流失严重。

2　材料与方法

2.1　试验小区设置

在云南省元谋县金雷国家水土保持科技示范园(101°35′—102°06′E,25°23′—26°06′N)设置径流观测场开展试验。本研究中试验小区设置坡度为 10°,相邻且坡向一致,2.5 m×10 m 的小区 6 个开展径流观测试验,小区底部与四周围埂均是由 10 cm 钢筋混凝土浇筑而成的密闭型小区,四周的围埂高出地面 30 cm 且向外倾斜,防止周围雨滴击溅进入试验小区造成误差。小区坡面底部设置挡土墙,挡土墙自上至下设置 3 个出水口,分别收集地表径流(0 cm)和壤中流(50,100 cm)。在小区坡脚隔墙内壁 50 及 100 cm 处与母岩平行修筑壤中流收集槽,坡脚隔墙外修筑有表面径流收集槽,配套修筑 3 个收集池与径流收集槽。选择当地典型燥红土,经搅拌机混匀后装填入标准径流小区,平整后于 2012 年进行葡萄、枣树和柱花草种植,葡萄、枣树样区采用株行距 1.5 m×1.5 m 进行种植,柱花草样区采用 5 cm×10 cm,果草复合间作模式则是在葡萄和枣树样区基础上,距离原作物行距 20 cm 进行种植,株行距与柱花草样区一致;裸地小区则不种植任何作物,定期清理植被,保证其植被覆盖率小于 5%。为了减少填充过程中扰动土壤带来的误差,保证土壤结构、特性与本区域坡地相同,小区建成后按照试验所需的种植模式种植多年后再进行试验数据的采集。

2.2　数据采集

于 2020 年开始监测和数据采集工作,每次降雨事件发生后的次日 8:00 采用人工取样法对不同种植模式下小区的地表径流、壤中流以及其中的泥沙含量进行测量和取样,径流深通过量取集流池中水深,再结合池底面积求得径流量,泥沙含量则采用搅拌舀水取样法及烘干法测定。降雨量数据由园内全自动气象站进行采集,对雨季生长旺盛期的径流小区采用无人机拍照图像处理软件计算投影面积法进行植被覆盖度调查,裸地、柱花草、枣树、枣树+柱花草、葡萄、葡萄+柱花草的植被覆盖度分别为:2%,96%,27%,83%,23%,81%。土壤流失量计算公式为:

$$Q=\frac{G\times 10}{S}$$

式中:Q 表示土壤流失量(t/hm^2);G 表示泥沙总量(kg);S 表示监测小区面积(m^2)。

2.3　数据处理

采用软件 Excel 2018 进行数据整合,运用 SPSS 22.0 进行显著性和相关性分析,图片则利用软件 Oringin 2021 进行绘制。

3　结果与分析

3.1　元谋干热河谷降雨特性

研究区降雨资料统计结果表明,2020 年,元谋干热河谷全年降雨量为 472.7 mm,主要集中在 6—8 月,占全年总降雨量的 78.88%。8 月份降雨量最高(154.7 mm),占全年总降雨量的 32.73%,3 月份降雨量最低,仅为 0.2 mm,占全年总降雨量的 0.001%。由表 1 可知,监测区 2020 年全年径流小区产流的降雨次数共计 10 场(4 月 30 日至 8 月 30 日),侵蚀性降雨总量为 330.1 mm,占全年降雨量 69.83%。侵蚀性降雨量为 13.2～69.2 mm,平均雨强 1.2～9.2 mm,I_{30}(最大 30 min 降雨强度)8.9～36.9 mm/h。根据中国气象局降水强度等级划分标准(内陆版),可将降雨划分为小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个等级,其对应小时降雨量为:$p<10$,$10\leqslant p<25$,$25\leqslant p<49.9$,$p\geqslant 50.0$。根据中国气象局降水强度等级划分标准,2020 年元谋干热河谷发生侵蚀性降雨共 10 场,其中中雨 5 场,大雨 2 场,暴雨 3 场,区域侵蚀性降雨类型以中雨为主。

表 1　元谋干热河谷侵蚀性降雨特征参数(2020 年)

Table 1　Characteristic parameters of erosive rainfall in Yuanmo dry-hot valley

降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/h	平均雨强/(mm·h^{-1})	I_{30}/(mm·h^{-1})	降雨等级
0430	13.2	2.0	6.6	21.4	中雨
0615	69.2	25.0	4.8	36.9	暴雨
0619	18.9	6.0	3.2	23.4	中雨
0701	27.3	16.0	1.7	9.3	大雨
0703	53.3	22.0	3.9	45.1	暴雨
0720	13.4	15.0	1.9	10.6	中雨
0806	15.6	3.0	5.2	24.7	中雨
0814	22.7	11.0	2.1	8.9	中雨
0820	29.4	25.0	1.2	13.1	大雨
0830	67.1	46.0	9.2	45.0	暴雨

3.2　不同种植模式对降雨径流再分配的影响

3.2.1　不同种植模式对雨后坡面径流结构组成的影响　对研究区年度内监测到的 10 次径流进行分析,径流所占比例特征如图 1 所示。由图 1 可知,垂向输出的径流量组成特征相似,不同种植模式样地和裸地径流均以地表径流为主,地表径流占径流总量均超过 53.23%,裸地地表径流比例高达 94.07%;各模式地表径流较裸地减少了 50.79%～89.70%,而 50 cm 和 100 cm 处壤中流径流量均增加了 16.8%～870.48%。各模式的 100 cm 处壤中径流量比例均高于 50 cm 处壤中径流量,且种植作物后土壤深层径流量比例更大,推测是因为本次监测小区为密闭型小区,土壤水分在作物根系和自然下渗的作用下到达监测小区土

壤底层。不同作物空间配置模式存在差异，立体配置的果草复合间作模式能显著减少地表径流比例，并增加 50 cm 处和 100 cm 处壤中流径流比例。在单作模式中，柱花草模式的减流效果最佳，在 50 cm 处壤中流和 100 cm 处壤中流所占总径流量比例均较高，柱花草、枣树、葡萄模式在 50 cm 处壤中流和100 cm 处壤中流占总径流量的比例分别为 13.20%和 15.45%，3.15%和 6.68%，5.20%和9.60%；在果草复合间作模式中，枣树＋柱花草模式的减流效益最佳，在 50 cm 处壤中流和 100 cm 处壤中流所占总径流量比例亦最高，枣树＋柱花草、葡萄＋柱花草模式在 50 cm 处壤中流和 100 cm 处壤中流占总径流量的比例分别为 15.36%和 31.35%，12.75%和 27.45%。

3.2.2 不同种植模式对坡面径流垂向分层输出的影响 不同种植模式地表径流量较裸地均显著降低(图 2a)，裸地地表径流分别是柱花草、枣树、葡萄、葡萄＋柱花草、枣树＋柱花草模式的 5.50，2.03，8.22，3.28 和 9.71 倍，说明增加植被覆盖能显著减少地表径流量，其中，间作模式效果优于单作，枣树＋柱花草的果草复合间作模式效果最佳。当土壤表层达到饱和后，土壤水分逐渐向表土层横向和纵向流动。由图 2b 可知，枣树＋柱花草和葡萄＋柱花草两种模式的 50 cm 壤中流量显著高于裸地，枣树、葡萄的两种模式的 50 cm 壤中流量显著低于裸地；枣树＋柱花草和葡萄＋柱花草两种模式的 100 cm 壤中流量显著高于其他样地，葡萄＋柱花草模式 100 cm 壤中流量最高，单作中柱花草模式 100 cm 壤中流量最高，其余几种单作模式之间差异不显著(图 2c)；由图 2d 可知，不同种植模式的径流系数由大到小依次为：裸地(0.314)＞枣树(0.161)＞葡萄(0.106)＞葡萄＋柱花草(0.086)＞柱花草(0.075)＞枣树＋柱花草(0.067)。单作模式中，柱花草的径流系数最小；果草复合间作模式下，径流系数明显降低，枣树＋柱花草的模式径流系数最小。不同种植模式的减流效益存在差异(表 2)，其中，枣树＋柱花草模式的减流效益最高(78.53%)，枣树模式的减流效益最低(48.65%)，间作模式的减流效益均高于单作模式。

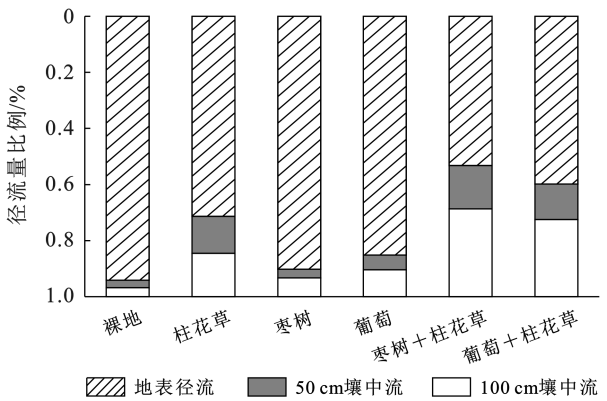
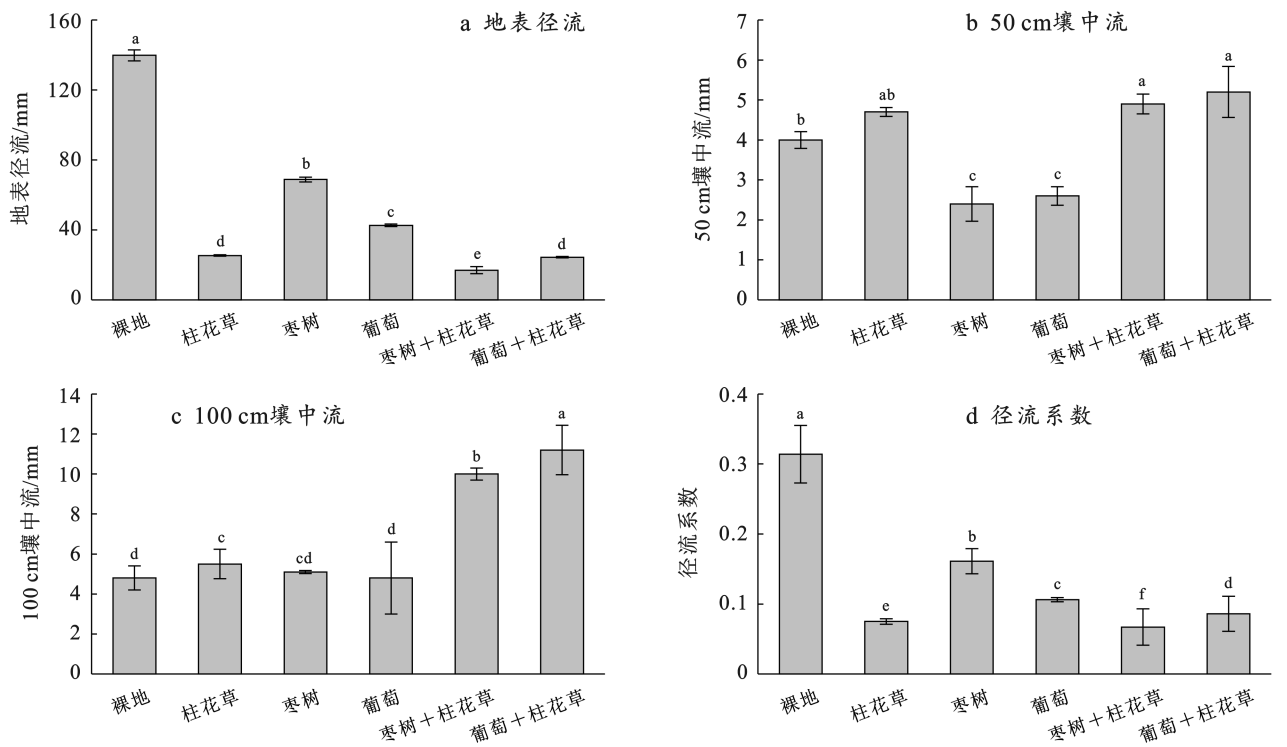


图 1 不同种植模式土壤径流年输出比例

Fig.1 Annual output ratio of soil runoff under different cropping patterns



注：柱上不同小写字母表示不同种植模式之间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同种植模式径流垂向输出特征

Fig.2 Characteristics of runoff vertical output in different planting patterns

表 2　不同种植模式减流减沙效益

Table 2　Benefits of flow and sediment reduction by different planting patterns

水保效益	不同种植模式				
	柱花草	枣树	葡萄	枣树＋柱花草	葡萄＋柱花草
减流效益/%	76.00	48.65	66.35	78.53	72.54
减沙效益/%	60.15	52.32	58.70	71.76	63.21

3.3　不同种植模式对泥沙流失量的影响

不同种植模式地表径流泥沙含量较裸地显著降低(图 3a),柱花草、枣树、葡萄、枣树＋柱花草、葡萄＋柱花草模式较裸地地表径流泥沙含量分别减少了 73.05%,54.66%,63.25%,77.13%和 74.34%,果草复合间作的两种模式的泥沙含量更低;除柱花草和枣树模式之间差异不显著,其余不同种植模式间 50 cm 壤中流泥沙含量存在差异(图 3b),柱花草、枣树模式的 50 cm 壤中流泥沙含量最高,枣树＋柱花草模式的 50 cm 壤中流泥沙含量最低;由图 3c 可知,枣树＋柱花草模式的 100 cm 壤中流泥沙含量最高,枣树模式的 100 cm 壤中流泥沙含量最低,间作模式的 100 cm 壤中流泥沙含量整体高于单作模式。不同种植模式的土壤流失量较裸地均显著降低(图 3d),柱花草、枣树、葡萄、枣树＋柱花草、葡萄＋柱花草模式相较于裸地土壤流失量分别降低了 85.11%,60.39%,65.06%,83.87%和 78.79%。柱花草土壤流失量最低,为 0.45 t/hm^2,枣树、葡萄在与柱花草间作后,土壤流失量明显降低。不同种植模式的减沙效益存在差异(表 2),其中,枣树＋柱花草模式的减沙效益最高(71.76%),枣树模式的减沙效益最低(52.32%),间作模式的减沙效益均高于单作模式。

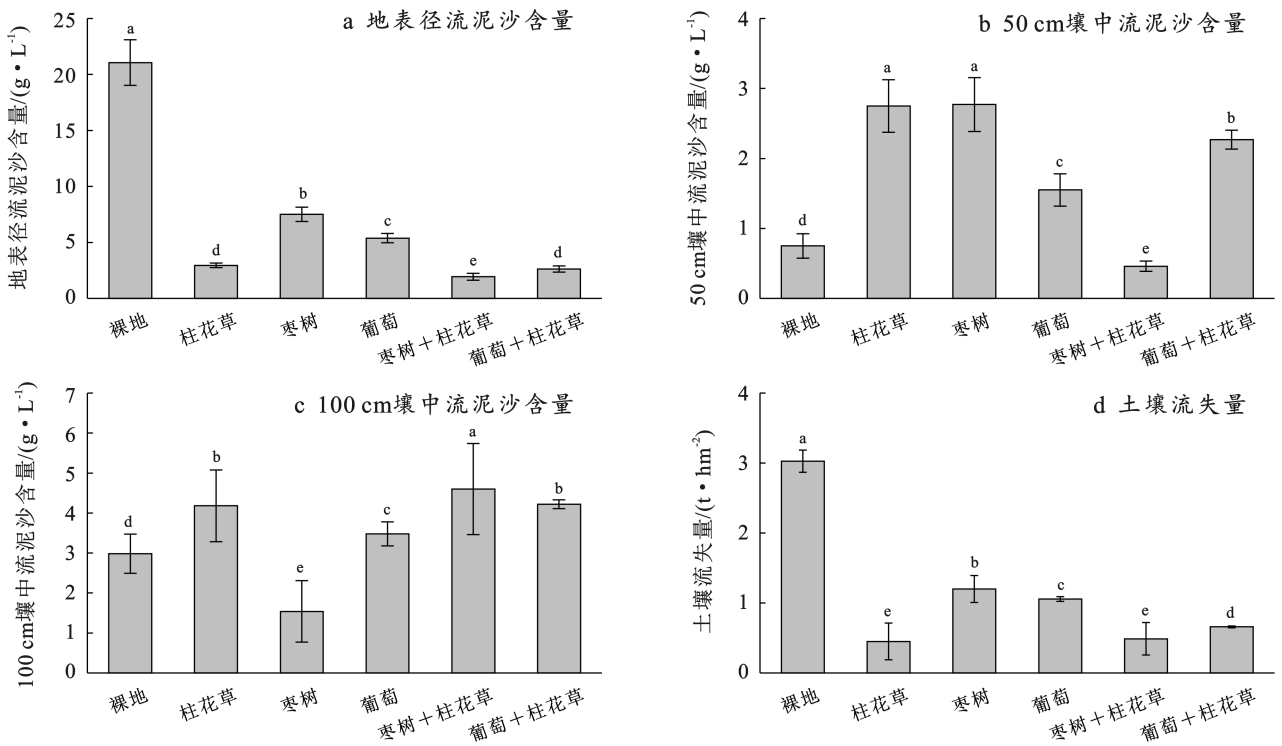


图 3　不同种植模式泥沙垂向输出特征

Fig.3　Vertical output characteristics of sediments under different planting patterns

3.4　降雨强度对坡耕地产流产沙的影响

不同降雨强度下监测小区产流产沙情况详见表 3。不同雨强下地表径流、50 cm 处壤中流和 100 cm 处壤中流均存在差异,随着雨强的增大,地表径流、50 cm 处壤中流、100 cm 处壤中流、径流系数、泥沙含量均增大。其中小雨(32 场次)没有产流,暴雨条件下单场平均降雨的地表径流、50 cm 处壤中流和 100 cm 处壤中流分别为中雨的 2.88,10.04 和 14.09 倍,为大雨的 2.31,3.92 和 5.29 倍;暴雨条件下单场平均降雨的径流系数与泥沙含量则为中雨的 3.67 和 1.63 倍,为大雨的 2.66 和 1.05 倍。产流降雨中中雨比例最高(50%),暴雨比例仅 30.00%,但其地表径流、50 cm 处壤中流、100 cm 处壤中流占产流总径流量的 56.14%,73.82%和 79.37%。在全年产流降雨场次中暴雨比例不高,却贡献了全年 60.66%的径流,说明降雨强度在很大程度上影响坡面产流。

表 3 不同雨强等级下坡地产流产沙情况

Table 3 Runoff and sediment yield of downslope land with different rainfall intensity grades

雨强分级	降雨场次	降雨历时/h	地表径流/(mm/场)	50 cm 处壤中流/(mm/场)	100 cm 处壤中流/(mm/场)	径流系数	泥沙含量/(kg·m^{-3})
中雨(10≤P<25)	5	142	19.7	0.8	0.9	0.045	3.43
大雨(25≤P<50)	2	89	24.6	2.2	2.5	0.062	5.33
暴雨(P≥50)	3	166	56.7	8.4	13.0	0.165	5.58

3.5 不同种植模式下影响坡耕地产流产沙因素分析

为进一步分析不同种植模式下影响坡耕地侵蚀产流产沙的因素,对不同种植模式下坡耕地水沙指标(径流量、水土流失量)与降雨特征参数(降雨量、降雨历时、平均雨强、I_{30})进行相关性分析(表 4)。由表 4 可知,不同种植模式下影响坡面侵蚀产沙的因素存在差异,不同种植模式的径流量均与降雨量存在显著(p<0.05,下同)(葡萄模式)和极显著(p<0.01,下同)(裸地、柱花草、枣树、枣树+柱花草、葡萄+柱花草模式)的正相关关系,不同种植模式的径流量均与土壤流失量均存在显著正相关关系,表明降雨量大小是影响坡面产流和进一步造成水土流失的重要因素。对于裸地,降雨量和降雨历时显著影响径流量,但对土壤流失量影响不显著;除了平均雨强对柱花草模式的径流量和土壤流失量影响不显著外,其余降雨参数(降雨量、降雨历时、I_{30})均对径流量和土壤流失量存在显著影响;葡萄模式则仅径流量与降雨量存在极显著正相关关系,枣树、枣树+柱花草模式下的径流量与降雨量存在极显著正相关关系,与 I_{30} 存在显著正相关关系;葡萄+柱花草模式的径流量与各降雨参数均存在显著正相关关系,降雨量和降雨历时亦对土壤流失量存在显著影响。对不同种植模式坡耕地水沙指标总量(径流量、水土流失量)与降雨特征参数(降雨量、降雨历时、平均雨强、I_{30})、植被覆盖度进行相关性分析可知,降雨量、降雨历时、I_{30} 均对径流量和土壤流失量存在显著影响,植被覆盖度则存在显著负相关关系,说明植被覆盖度也是影响坡耕地产流产沙的重要因素。

表 4 不同种植模式下坡面水沙指标与降雨特征参数和植被覆盖度的相关分析

Table 4 Correlation analysis of runoff and sediment indexes with rainfall characteristics and vegetation coverage under different planting patterns

模 式	水沙指标	降雨量	降雨历时	平均雨强	I_{30}	土壤流失量	植被覆盖度
裸 地	径流量	0.724**	0.651*	0.397	0.473	0.675*	—
	土壤流失量	0.489	0.594	0.561	0.570	—	—
柱花草	径流量	0.880**	0.796**	0.554	0.659*	0.642*	—
	土壤流失量	0.649*	0.682*	0.548	0.643*	—	—
枣 子	径流量	0.782**	0.552	0.475	0.648*	0.697*	—
	土壤流失量	0.224	0.003	0.090	0.288	—	—
葡 萄	径流量	0.649*	0.367	0.218	0.410	0.704*	—
	土壤流失量	0.510	0.427	0.482	0.534	—	—
枣树+柱花草	径流量	0.846**	0.628	0.470	0.693*	0.783*	—
	土壤流失量	0.364	0.378	0.271	0.447	—	—
葡萄+柱花草	径流量	0.857**	0.814**	0.669*	0.698*	0.930**	—
	土壤流失量	0.707*	0.743*	0.629	0.625	—	—
总 量	径流量	0.618**	0.501**	0.369**	0.464**	0.722**	−0.382**
	土壤流失量	0.332**	0.308*	0.300*	0.362**	—	−0.459**

注:* 表示显著相关(ρ<0.05);* * 表示极显著相关(ρ<0.01)。

4 讨 论

不同种植模式样地和裸地的径流垂直分层特征相似,均以地表径流为主,地表径流比例 53.23%~94.07%,这与张杰[25]的江西红壤坡地径流研究存在差异,这主要是干热河谷的降雨特征和土壤条件造成的。传统红壤孔隙度大,且相对松散,降水更易入渗为土壤深层水分,因此坡面径流以壤中流为主,但元谋干热河谷的燥红壤退化严重,坡地表层易板结,土壤入渗性能差,加之干热河谷地区多短时强降雨,降雨多以地表径流流动,造成了当地严重的水土流失问题[26]。

不同种植模式均能显著减少地表径流,更好地调

控径流在深土层分配,增加深层土壤水分的比例,从地表到 100 cm 土壤层,土壤水分的垂直分布都存在较大差异,体现不同植被种类及种植方式对坡面径流垂向输出的调控机制。有植被覆盖小区的地表径流远远小于裸地,说明植被茎叶能够减小降雨势能,使雨滴分散,同时地表的茎秆对雨水有拦蓄作用,增加雨水下渗[27],而裸地由于自然退化和雨滴击溅作用堵塞毛细管,使得地表层板结,入渗性能下降,大量降雨多以地表径流形式流走[26]。此外,本研究与马传功等[3]、Homulle 等[8]和陈小强等[15]开展的间作研究得出一致结论,即复合间作模式的减流减沙效果更好。单作模式下,枣树和葡萄模式下的地表径流深分别为 68.8 和 42.6 mm,土壤流失量分别为 1.20 和 1.51 t/hm^2,间作柱花草后,枣树和葡萄模式的地表径流深分别下降了 75.29%和 42.72%,土壤流失量分别下降了 59.30%和 37.56%,说明在果树行间配置牧草可以有效增加水分入渗和利用,发挥拦蓄径流作用,同时固结土壤,有效减少土壤流失,起到减少水土流失作用。一方面果树高矮错落搭配,增加了地表覆盖度[23],可以有效截留降雨,减少对地表的冲击,间作植物根系改良土壤结构,使土层孔隙度增加[9],增加水分入渗,减少击溅泥沙产生[13];另一方面,植被茎秆的生长增加地表粗糙度,减缓地表径流流速,降低其挟沙能力,从而达到减少泥沙流失的目的[28]。张平仓等[29]的研究发现壤中流能将土体中的细颗粒物带走,促进土壤团聚体发育,提高土壤抗冲和抗崩解性能,本研究发现果草复合间作模式的 100 cm 壤中流量显著高于其他样地,说明间作模式更有利于增加降雨的补给深度,增加壤中流流量,起到一定的水土保持作用,这与张先来等[30]果园间作土壤水分研究结果相一致。

降雨量是直接影响各土层径流的重要因素[31-32],本研究也发现各种植模式及裸地的径流量均与降雨量存在显著关系。但因干热河谷特殊的降雨特性,全年总降雨量低,降雨集中,暴雨场次占统计 10 次产流的 30.00%,却贡献了全年总径流的 60.66%,因此降雨强度也是一个影响坡面径流的重要因素。径流量与土壤流失量间存在显著的相关关系,说明降雨量和降雨强度通过影响径流大小和入渗速率,进而影响坡面的水沙特征。本研究还发现植被覆盖度能够显著影响径流量和土壤流失量,尤其是果草复合间作模式下,地表径流量和土壤流失量明显降低。这与 Rodrigo-Comino 等[33]、王栋栋等[34]的研究一致,增加植被覆盖度可以增加入水分入渗,减少径流,同时也减少径流中的泥沙量,从而起到控制坡面侵蚀的作用。

坡耕地作物间作模式是一种能够防治水土流失和土壤改良的生态工程措施,在坡耕地采用果草复合间作模式既充分利用干热河谷地区的光热资源和水资源,又能为干热河谷区突出的水土流失和土壤养分流失问题提供一些解决思路,有很好的推广前景与运用价值。本研究重点研究了坡耕地不同种植模式对径流分配及水土流失的影响,没有定量不同种植模式中不同作物生长对降雨的截留消能作用,且局限于干热河谷燥红土区域开展单点监测工作,后续将在干热河谷开展其他土壤类型的长期定位监测,引入新的监测技术,加强产流过程监测,关注不同种植模式对降雨的拦蓄作用及不同种植模式中作物合理密度与水土保持效应间关系的研究,以期能为干热河谷坡耕地构建适宜的作物种植模式提供更全面的理论支持。

5　结 论

干热河谷坡耕地不同种植模式降雨径流均以地表径流为主(53.20%～94.07%),不同种植模式均能显著减少地表径流(50.79%～89.70%)和径流泥沙含量(54.66%～77.13%);降雨量、降雨强度和植被覆盖度是影响坡耕地水土流失的重要因素,其中区域暴雨场次所占比例仅 30%,却贡献了全年 60.66%的径流,良好的植物覆盖能有效减少降雨侵蚀的影响;干热河谷坡耕地不同种植模式主要通过调控径流在深土层分配达到固土保水的目的,其中,果草复合间作模式更有利于将表层径流导入土壤深层,增加土壤深层含水量,发挥减流减沙的水土保持效益。

参考文献(References)

[1]　张霞,张育林,刘丹,等.种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):250-261.
Zhang Xia, Zhang Yulin, Liu Dan, et al. Effects of planting methods and tillage systems on soil structure and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3):250-261.

[2]　Patin J, Mouche E, Ribolzi O, et al. Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: An analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database [J]. Journal of Hydrology, 2018,563:480-494.

[3]　马传功,陈建军,郭先华,等.坡耕地不同种植模式对农田水土保持效应及土壤养分流失的影响[J].农业资源与环境学报,2016,33(1):72-79.
Ma Chuangong, Chen Jianjun, Guo Xianhua, et al. Effects of different cropping patterns on soil and water conservation benefits and soil nutrients loss on sloping land [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016,33(1):72-79.

[4] Nyawade S O, Gachene C K K, Karanja N N, et al. Controlling soil erosion in smallholder potato farming systems using legume intercrops [J]. Geoderma Regional, 2019,17:e00225.

[5] 李海,沈鹏,吕凯,等.玉米间作大豆行比配置对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):11-19.
Li Hai, Shen Peng, LüKai, et al. Effect of row ratio configuration of maize intercropping soybean on soil and water loss in slope farmland [J]. Research of Soil and Water Conservation,2024,31(4):11-19.

[6] 富涵,郑粉莉,覃超,等.东北薄层黑土区作物轮作防治坡面侵蚀的效果与 C 值研究[J].水土保持学报,2019,33(1):14-19.
Fu Han, Zheng Fenli, Qin Chao, et al. Effects of crop rotation on preventing hillslope soil erosion and its C factor's variation in thin layer mollisol region of the Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(1):14-19.

[7] 寇建村,杨文权,程国亭,等.行间种植不同草种对幼龄苹果园土壤特性的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):145-152.
Kou Jiancun, Yang Wenquan, Cheng Guoting, et al. Effects of different grasses between rows of apple trees on soil characteristics of 1-year-old orchard [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012,30(4):145-152.

[8] Homulle Z, George T S, Karleyk A J, et al. Root traits with team benefits: Under standing below ground interactions in inter cropping syetems [J]. Plant, 2021,471(1/2):1-26.

[9] 卢玉鹏,高柱,张小丽,等.果园生态系统复合经营的开展模式及生态机制综述[J].中国果树,2021(12):9-15.
Lu Yupeng, Gao Zhu, Zhang Xiaoli, et al. Review on the development model and ecological mechanism of compound management of orchard ecosystem [J]. China Fruits, 2021(12):9-15.

[10] Dong Yifan, Xiong Donghong, Su Zheng'an, et al. The distribution of and factors influencing the vegetation in a gully in the dry-hot valley of Southwest China [J]. CATENA, 2014,116:60-67.

[11] 岳学文,潘志贤,史亮涛,等.金沙江干热河谷典型灌木群落的土壤养分特征[J].西南农业学报,2016,29(11):2665-2668.
Yue Xuewen, Pan Zhixian, Shi Liangtao, et al. Characteristics of soil nutrients in typical shrub communities in arid-hot valley of Jinsha River [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016,29(11):2665-2668.

[12] 郑海金,左继超,奚同行,等.红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成[J].土壤学报,2018,55(5):1168-1178.
Zheng Haijin, Zuo Jichao, Xi Tonghang, et al. Nitrogen output through runoff on red soil slope and its composition [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018,55(5):1168-1178.

[13] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等.红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J].水土保持学报,2014,28(6):41-45.
Zheng Haijin, Hu Jianmin, Huang Pengfei, et al. Comparative study of nitrogen and phosphorus through surface-flow and interflow on red soil farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(6):41-45.

[14] Duchene O, Vian J F, Celette F. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017,240:148-161.

[15] 陈小强,范茂攀,王自林,等.不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):48-52.
Chen Xiaoqiang, Fan Maopan, Wang Zilin, et al. Effect of different planting patterns on soil and water conservation of sloping cropland in Central Yunnan [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(4):48-52.

[16] 邹鑫,朱习爱,陈春峰,等.农林复合系统的水土保持效益[J].云南大学学报(自然科学版),2020,42(2):382-392.
Zou Xin, Zhu Xiai, Chen Chunfeng, et al. Soil and water conservation benefits of agroforestry systems [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2020,42(2):382-392.

[17] 荆文涛,陈澍,祖艳群,等.不同种植模式下红壤坡田水土及养分流失研究[J].环境科学与技术,2015,38(11):66-70.
Jing Wentao, Chen Shu, Zu Yanqun, et al. Soil erosion and nutrient loss of sloping farmland in red soil region under different cropping patterns [J]. Environmental Science & Technology, 2015,38(11):66-70.

[18] 孟凡旭,王树森,马迎梅,等.不同果农复合种植模式土壤入渗能力及其影响因素[J].干旱区研究,2020,37(6):1469-1477.
Meng Fanxu, Wang Shusen, Ma Yingmei, et al. Soil infiltration ability and influencing factors under different intercropping patterns in orchards in the Gully Region of Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2020,37(6):1469-1477.

[19] 王沛娟,李玲,李田甜,等.不同配置模式下枣棉间作复合系统耗水特性研究[J].江苏农业科学,2022,50(8):207-214.
Wang Peijuan, Li Ling, Li Tiantian, et al. Research on water consumption characteristics of jujube-cotton intercropping compound system under different configu-

ration modes [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(8):207-214.

[20] 杨淏舟,王艳丹,岳学文,等.扭黄茅+三芒草群落对干热河谷区雨后径流的再分配作用[J].中国水土保持,2021(10):60-63.
Yang Haozhou, Wang Yandan, Yue Xuewen, et al. Redistributive effect of *Heteropogon contortus*+*Aristida adscensionis* grass communities on post rain runoff in dry-hot river valley [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(10):60-63.

[21] 何光熊,易克贤,陈何龙,等.干热河谷雨养坡地剑麻和番麻的径流分配作用及水土保持效应[J].热带农业科学,2019,39(3):31-38.
He Guangxiong, Yi Kexian, Chen Helong, et al. Runoff distribution and soil and water conservation effects of *Agave sisalana* and *Agave americana* on slope land under natural rainfall in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2019,39(3):31-38.

[22] 姚丽,刘倩,王金华,等.紫花苜蓿种植模式对干热河谷咖啡园土壤质量的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(6):1360-1368.
Yao Li, Liu Qian, Wang Jinhua, et al. Effects of *Medicago sativa* L. planting patterns on the quality of coffee plantation soil in a dry-hot valley area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(6):1360-1368.

[23] 周星宇,陈绪文,龚伟,等.大渡河干热河谷区核桃林下种植模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J].西北林学院学报,2020,35(1):21-27.
Zhou Xingyu, Chen Xuwen, Gong Wei, et al. Effects of under-forest planting patterns on fractal features of soil aggregate structure in the dry-hot valley of Dadu River [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020,35(1):21-27.

[24] 纪中华,方海东,杨艳鲜,等.金沙江干热河谷退化生态系统植被恢复生态功能评价:以元谋小流域典型模式为例[J].生态环境学报,2009,18(4):1383-1389.
Ji Zhonghua, Fang Haidong, Yang Yanxian, et al. Assessment of system functions after vegetation restoration of the degraded ecosystem in arid-hot valleys of Jinsha River: A case study on small watershed of Yuanmou [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(4):1383-1389.

[25] 张杰,谢颂华,莫明浩,等.不同自然降雨雨型下红壤坡地地表径流和壤中流输出特征[J].水电能源科学,2017,35(7):18-21.
Zhang Jie, Xie Songhua, Mo Minghao, et al. Characteristics of surface runoff and interflow output on red-soil slope under different rainfall patterns of natural rainfall conditions [J]. Water Resources and Power, 2017,35(7):18-21.

[26] Yang Dan, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Effect of grass basal diameter on hydraulic properties and sediment yield processes in gully beds in the dry-hot valley region of Southwest China [J]. Catena, 2017,152:299-310.

[27] Liancourt P, Sharkhuu A, Ariuntsetseg L, et al. Temporal and spatial variation in how vegetation alters the soil moisture response to climate manipulation [J]. Plant and Soil, 2012,351(1):249-261.

[28] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:98-118.
Huang Chanyong. Pedology [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:98-118.

[29] 张平仓,程冬兵.南方坡耕地水土流失过程与调控研究[J].长江科学院院报,2017,34(3):35-39.
Zhang Pingcang, Cheng Dongbing. Process and regulation of soil and water loss of slope farmland in South China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017,34(3):35-39.

[30] 张先来,李会科,张广军,等.种植不同牧草对渭北苹果园土壤水分影响的初步分析[J].西北林学院学报,2005,20(3):56-59.
Zhang Xianlai, Li Huike, Zhang Guangjun, et al. Effects of interplanting different herbage on soil moisture in apple orchards of Weibei Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005,20(3):56-59.

[31] 张杰,谢颂华,莫明浩,等.不同覆盖红壤坡地磷素随径流分层输出的特征[J].中国水土保持科学,2017,15(4):68-77.
Zhang Jie, Xie Songhua, Mo Minghao, et al. Characteristics of phosphorus output through runoff from different soil layers by different land cover treatments in red soil slopes [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017,15(4):68-77.

[32] Kienzler P M, Naef F. Temporalvariability of subsurface storm flow:1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope [J]. Water Resources Research, 2006,42(2):1-11.

[33] Rodrigo-Comino J, Taguas E, Seeger M, et al. Quantification of soil and water losses in an extensive olive orchard catchment in Southern Spain [J]. Journal of Hydrology, 2018,556:749-758.

[34] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
Wang Dongdong, Wang Zhanli, Zhang Qingwei, et al. Experiment on influence of cover degree, slope and rainfall intensity on sediment concentration of slope runoff in rangeland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 119-125.