

# 玉米间作大豆行比配置对坡耕地水土流失的影响

李海, 沈鹏, 吕凯, 阮贞静, 李梅, 刘廷菊, 安瞳昕

(云南农业大学 农学与生物技术学院 云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 昆明 650201)

**摘要:** [目的]探究玉米间作大豆不同行比配置的水土流失规律,为坡耕地具有水土保持效果的玉米间作大豆模式推广利用提供科学依据。[方法]在坡耕地条件下以玉米间作大豆为研究对象,选定坡度( $10^{\circ}$ ,  $16^{\circ}$ ,  $22^{\circ}$ )和降雨强度(40, 80, 120 mm/h),通过人工模拟降雨试验,探究玉米、大豆单作及玉米||大豆 2:1(2行玉米间作1行大豆), 2:2, 2:3, 2:4行比配置的水土流失特征。[结果]玉米||大豆 2:4行比配置较玉米单作、玉米||大豆 2:1, 2:2, 2:3行比配置、大豆单作地表径流量平均减少 64.23%, 57.19%, 31.17%, 10.12%, 0.36%, 侵蚀量平均减少 82.90%, 80.75%, 46.53%, 29.78%, 36.33%, 地表径流产流时间平均延缓 101.55%, 49.06%, 23.13%, 30.77%, 0.82%。雨强和径流产生时间、入渗流产生时间呈极显著负相关,和径流量、侵蚀量呈极显著正相关,坡度和径流产生时间呈显著负相关,在高雨强、高坡度下间作较大豆单作水土保持效果表现更好。[结论]总体来看,玉米||大豆 2:4行比配置在不同雨强和坡度下水土保持效果较好,是一种合理可行的山区坡耕地作物多样性种植方式。

**关键词:** 行比配置; 水土流失; 坡耕地; 间作

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0011-09

## Effect of Row Ratio Configuration of Maize Intercropping Soybean on Soil and Water Loss in Slope Farmland

Li Hai, Shen Peng, Lü Kai, Ruan Zhenjing, Li Mei, Liu Tingju, An Tongxin

(Key Laboratory for Crop Production and Smart Agriculture of Yunnan Province,

College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the soil erosion patterns of maize intercropping soybean with different row ratios, and to provide scientific basis for the promotion and utilization of maize intercropping soybean models with soil and water conservation effects in sloping farmland. [Methods] Taking maize intercropping with soybean as the research object under the condition of sloping farmland, the slope ( $10^{\circ}$ ,  $16^{\circ}$ ,  $22^{\circ}$ ) and rainfall intensity (40, 80, 120 mm/h) were selected. Through the artificial rainfall simulation experiment, the soil and water loss characteristics of maize, soybean monoculture and maize intercropping with soybean 2:1 (two rows of maize intercropping with one row of soybean), 2:2, 2:3, 2:4 row ratio were explored. [Results] Compared with maize monoculture, maize intercropping with soybean 2:1, 2:2, 2:3 row ratio, and soybean monoculture, the surface runoff of maize intercropping with soybean 2:4 row ratio decreased by 64.23%, 57.19%, 31.17%, 10.12%, 0.36%, the erosion amount decreased by 82.90%, 80.75%, 46.53%, 29.78%, 36.33%, and the runoff time was delayed by 101.55%, 49.06%, 23.13%, 30.77%, 0.82% on average. Rainfall intensity was negatively correlated with runoff generation time and infiltration generation time, and positively correlated with runoff and erosion, while slope was negatively correlated with runoff generation time. Soil and water conservation effect of

收稿日期: 2023-06-30

修回日期: 2023-08-30

资助项目: 国家自然科学基金(31660378); 云南省重大科技专项绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG00902)

第一作者: 李海(1999—), 男, 甘肃酒泉人, 硕士研究生, 研究方向为作物多样性种植与山地可持续农业。E-mail: 15097220154@163.com

通信作者: 安瞳昕(1974—), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事作物品种与生态农业可持续发展。E-mail: tongxinan2012@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

intercropping was better than that of soybean monoculture under high rainfall intensity and high slope. [Conclusion] In general, the 2 : 4 row ratio of maize and soybean intercropping has better soil and water conservation effect under different rainfall intensity and slope, which is a reasonable and feasible crop diversity planting method in mountainous slope farmland.

**Keywords:** row ratio configuration; soil erosion; sloping farmland; intercropping

我国是世界上水土流失最严重的国家之一,而坡耕地是水土流失的主要策源地。据统计,我国总耕地中拥有坡耕地 2 400 万  $\text{hm}^2$ , 占全国耕地总面积的 19.7%, 坡耕地的土壤侵蚀量占全国总量的 28.3%。而云南省总体属于山地高原地形,高原和山地面积约占省内总面积的 94%, 全省  $6^\circ \sim 25^\circ$  坡耕地占总耕地面积的 58.32%<sup>[1]</sup>, 耕地总体质量明显偏低。至 2021 年,云南省水土流失面积达 9.93 万  $\text{km}^2$ , 占全省土地总面积的 25.20%<sup>[2-3]</sup>, 因此坡耕地水土流失的治理对于解决土壤侵蚀问题有重要意义。目前,在农田水土保持方面已开展大量研究,如降雨情况、坡度、作物覆盖度、植被类型、土壤条件及人为管理措施等多种因素对农田土壤水土流失的影响<sup>[4-5]</sup>。然而,受社会经济和技术条件等因素的制约,相关研究在坡耕地实践中难以大范围推行。从作物产量、品质、水土保持效益等因素来看,间作作为重要的多样性种植模式,在坡耕地的生产应用将有较大的发展潜力。

间作是一种利用广泛的农业生态系统,在控制耕地土壤侵蚀中发挥着重要作用,大量研究围绕地上和地下部空间进行探索,探究间作对土壤侵蚀的影响及调控作用<sup>[6]</sup>。陈小强等<sup>[7]</sup>研究玉米与大豆的间作体系,发现其产流量比大豆单作、玉米单作和裸地分别减少了 19.40%, 23.01%, 29.40%。张丽等<sup>[8]</sup>通过研究不同种植模式对坡耕地水土保持效应发现,玉米大豆间作种植模式比单作的土壤流失量有所降低,对坡耕地水土保持具有比较明显的优越性。王永刚等<sup>[9]</sup>研究表明玉米间作马铃薯 2 : 2 的径流量和侵蚀量与玉米单作相比分别减少 12.11%, 4.84%, 玉米间作马铃薯 4 : 4 的径流量和侵蚀量与玉米单作相比分别减少 21.82%, 23.53%, 由此说明玉米间作马铃薯在不同行比下其水土流失具有差异。相比于单作,间作在冠层覆盖和土壤根系结构更有优势,间作不同行比配置通过许多过程可以实现对水土流失的控制,从地上部来看,土壤泥沙及养分的流失量随植被覆盖率的提高而减小<sup>[10-11]</sup>。植被的枝叶通过增大阻力,减小雨滴的动能,降低雨滴对地表土壤的溅蚀,植被覆盖率的提高,可以增大土壤入渗率<sup>[12-13]</sup>。从地下部来看,根系在间作控制土壤侵蚀中也发挥着重要的作用,如改变根系的分布,增加根系密度,改变根系形态及

构型<sup>[14-16]</sup>。根系的这些变化改变了降雨下渗过程中的土壤水分分布<sup>[17]</sup>, 增加土壤水分的吸收,提高土壤水分的存储,进而能够增加土壤水分的渗入,从而减少地表径流的产生。

前人对间作的水土保持效应的研究主要体现在间作与单作相比对土壤侵蚀具有较好控制效果,然而玉米间作大豆种植模式不同行比配置下的水土流失规律尚不清楚,另外土壤侵蚀受坡度和雨强的影响较大,基于此开展间作不同行比在不同坡度和雨强条件下的水土保持效应研究,对于坡耕地玉米间作大豆行比的合理配置和坡耕地可持续发展具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地及试验装置概况

试验位于云南农业大学节水灌溉中心进行( $25^\circ 18' \text{N}$ ,  $102^\circ 45' \text{E}$ , 海拔 1 930 m), 人工模拟降雨装置由南京南林电子科技有限公司制造(下喷式, 型号为 HQJY, 雨强调节范围  $15 \sim 150 \text{ mm/h}$ , 降雨喷头高度设置为 9 m, 降雨均匀系数在 85% 以上)。微型径流小区采用自制可调节坡度( $0^\circ \sim 24^\circ$ )的钢槽(长度、宽度和深度分别为 160, 80, 30 cm), 钢槽下端上方和底部分别设置有导流管, 用于地表径流和入渗量的收集。

供试土壤为旱地红壤。土壤理化性状: 土壤有机质含量 41.46 g/kg, 全氮、全磷、全钾分别为 1.83 g/kg, 1.91 g/kg, 3.14 g/kg, 水解性氮为 146.20 mg/kg, 有效磷 72.41 mg/kg, 速效钾为 159.70 mg/kg, pH 值为 7.03。为了使得每个微型径流小区的土壤容重(控制在  $1.10 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ )基本一致, 收集种植作物 10 a 以上的耕作层 0—20 cm 土壤, 过 10 mm 的筛, 过筛的土壤按 5 cm 的厚度分 5 层填入微型径流小区。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为“桥单 6 号”, 大豆品种为“云黄 13”。采用随机区组设计, 在室内使用钢槽进行人工模拟降雨试验, 共设 6 个处理, 分别为玉米/大豆 2 : 1 间作(2M1S)、玉米/大豆 2 : 2 间作(2M2S)、玉米/大豆 2 : 3 间作(2M3S)、玉米/大豆 2 : 4 间作(2M4S)、单作玉米(M)、单作大豆(S), 各处理 3 次重复, 小区面积为  $1.6 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。

模拟降雨试验在 9 月 1 日—6 日(玉米乳熟期,

大豆结荚鼓粒期,地表覆盖较高)进行,根据当地坡耕地坡度范围,坡度设置为 $10^{\circ}$ , $16^{\circ}$ , $22^{\circ}$ ;根据当地降雨特性,设置降雨强度为40,80,120 mm/h进行人工模拟降雨,每个坡度和降雨强度重复3次,降雨历时为30 min,降雨前24 h用40 mm/h的雨强降雨1 h,保证各径流钢槽土壤含水量一致。

### 1.3 种植规格及田间管理

试验中玉米、大豆均于5月10日同时播种,所有处理均采用等高种植(防止坡耕地水土流失广泛施用的耕作措施),单作玉米的株行距为 $22.8\text{ cm}\times 65\text{ cm}$ ,种植密度为67 500株/hm<sup>2</sup>;单作大豆的株行距为 $13.3\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ ,种植密度为375 000株/hm<sup>2</sup>;玉米间作大豆中,玉米行距均为40 cm,大豆行距均为30 cm,玉米和大豆间行距为30 cm,间作玉米密度与单作玉米密度一致,间作大豆密度均为210 000株/hm<sup>2</sup>。玉米和大豆采用打塘穴播,播种时玉米施入底肥450 kg/hm<sup>2</sup>复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15),在玉米苗期和大喇叭口期分别追施尿素(总氮 $\geq 46.4\%$ )225,375 kg/hm<sup>2</sup>;大豆底肥施用复合肥450 kg/hm<sup>2</sup>复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)。玉米和大豆植株生长期间浇水、中耕除草、培土及病虫害防治等田间管理措施各处理均保持一致。

### 1.4 测定指标与方法

1.4.1 地表径流及入渗流产生时间测定 人工模拟降雨试验中降雨开始后用秒表记录地表径流和入渗流产生时间,单位以s表示。

1.4.2 地表径流量、入渗量及土壤侵蚀量测定 人工模拟降雨试验中模拟降雨结束后用直尺(精度0.1 cm)测定径流及入渗流收集桶内水的深度 $h$ (cm),根据圆台体积计算公式换算出各处理的径流量( $V_R$ )、下渗流量( $V_S$ )计算公式,计算各处理径流量、下渗流量,单位为m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。待测量完径流和下渗流水深后,将径流充分搅拌均匀,分上、中、下3层共取水样250 ml沉淀,过滤后在105℃条件下烘干至恒重(滤纸质量1.50 g),然后用电子秤(精度为0.000 1 g)称重,其重量为 $m$ ,最后再结合径流量 $V_R$ 根据公式计算得到土壤侵蚀量 $M$ ,单位为kg/hm<sup>2</sup>[18]。

$$V_R = V_S = 1/3\pi h(r^2 + R^2 + rR)/(1.6 \times 0.8 \times 100) \quad (1)$$

$$M = (m - 1.5) \times V_R \times 1000/250 \quad (2)$$

式中: $V_R$ , $V_S$ 为径流量、下渗流量(m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>); $h$ 为径流水深(cm); $R$ 为蓄水桶径流上半径(cm); $r$ 为蓄水桶底面半径(cm); $M$ 为土壤侵蚀量(kg/hm<sup>2</sup>); $m$ 为水样过滤后烘干重(g)。

### 1.5 数据处理

所有指标运用IBM SPSS Statistics 27.0进行方

差及相关分析,采用邓肯(Duncan)法进行多重比较,显著水平均为 $p < 0.05$ ,极显著水平均为 $p < 0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作不同行比配置对产流时间和入渗量的影响

2.1.1 间作不同行比配置对地表径流产流时间的影响 由表1可知,无论雨强和坡度如何改变,S处理较M处理、2M4S处理较2M1S处理地表径流产流时间均得到延长。40 mm/h雨强下,在坡度 $10^{\circ}$ 时,S处理与M处理相比产流时间极显著延长173.18%( $p < 0.01$ ),2M4S处理与2M1S处理相比显著延长77.40%( $p < 0.05$ ),在坡度 $16^{\circ}$ 和 $22^{\circ}$ 时,S处理与M处理相比产流时间显著延长25.28%,69.21%( $p < 0.05$ ),2M4S处理与2M1S处理相比极显著延长49.04%,74.56%( $p < 0.01$ )。80 mm/h雨强下,S处理在坡度 $10^{\circ}$ 和 $22^{\circ}$ 极显著高于M处理( $p < 0.01$ ),在坡度 $16^{\circ}$ 时,2M4S处理地表产流时间与2M3S,2M2S,2M1S处理相比分别增加39.81%,24.55%,57.35%。120 mm/h雨强下,在坡度 $10^{\circ}$ , $16^{\circ}$ 时M处理和S处理差异不显著( $p > 0.05$ ),2M4S处理显著高于2M1S处理( $p < 0.05$ ),坡度 $22^{\circ}$ 时M处理极显著高于S处理( $p < 0.01$ ),2M4S处理和2M1S处理差异不显著( $p > 0.05$ )。总体来看,2M4S处理较M,2M1S,2M2S,2M3S,S处理平均延长101.55%,49.06%,23.13%,30.77%,0.82%。

综上所述可知,单作中大豆相比玉米植株能够延缓地表径流产流时间,在间作也有此变化规律,在间作中产流时间随玉米大豆行比的增加有延长的趋势,在间作中2M4S处理较其他处理有效延长产流时间。同时,随着坡度的增加,2M4S处理较其他处理延长产流时间的效果逐渐削弱;随着雨强的增加,各处理间差异幅度逐渐减小。

### 2.1.2 间作不同行比配置对入渗流产流时间的影响

由表2可知,无论雨强和坡度如何改变,S处理的入渗流产流时间较M处理均有所缩短,S处理产流时间比M处理缩短1.76%~45.16%,且在120 mm/h雨强下坡度为 $16^{\circ}$ 和 $22^{\circ}$ 时差异极显著( $p < 0.01$ )。40 mm/h雨强下间作各处理间差异不显著( $p > 0.05$ ),在坡度 $10^{\circ}$ 和 $22^{\circ}$ 时2M3S处理有效缩短产流时间,2M3S处理产流时间在3个坡度下分别最大缩短76.03%,33.26%,37.8%,随着坡度增加,2M4S处理产流时间逐渐缩短,坡度 $22^{\circ}$ 比坡度 $10^{\circ}$ 产流时间缩短23.30%。在80 mm/h雨强下,坡度 $16^{\circ}$ 时,2M2S处理极显著低于2M1S,2M3S,2M4S处理( $p < 0.01$ ),产流时间分别缩短45.70%,39.20%,40.17%。坡度 $22^{\circ}$ 时,2M2S处理

显著低于 2M4S 处理 ( $p < 0.05$ )。在 120 mm/h 雨强下,除坡度 22°下,2M2S,2M3S 处理极显著低于 2M1S 和 2M4S 处理 ( $p < 0.01$ ),其余间作处理间差异不显著 ( $p > 0.05$ ),随着坡度的增加,不同间作处理间的差异逐渐增加,2M2S 处理产流时间与 2M1S 处理相比分别缩短 15.61%,19.27%,27.43%。

大豆和玉米相比能有效缩短入渗流产流时间,可能是因为大豆冠层低、叶片平展,对雨水有更好的拦截作用,从而促进入渗流产生,延缓地表径流产生;总体来看,产流时间随着雨强的增加逐渐缩短,2M3S 处理较其他间作处理相比产流时间有效减少,尤其在 40 mm/雨强或坡度 10°时,产流时间减少更显著。

表 1 间作不同行比配置对地表径流产流时间的影响方差分析

Table 1 Analysis of variance of the impact of intercropping with different row ratios on the time of surface runoff s

雨强/ (mm · h <sup>-1</sup> )	处理	坡度		
		10°	16°	22°
40	2M1S	192.45±27.67ABbc	102.93±10.77Bbc	74.22±4.48Bb
	2M2S	290.44±19.28ABab	119.08±7.77Bb	102.78±11.16ABab
	2M3S	216.50±43.46ABabc	101.89±5.42Bbc	79.45±6.11ABb
	2M4S	341.40±91.6Aa	153.41±8.99Aa	129.56±24.85Aa
	M	127.13±14.72Bc	92.19±2.26Bc	76.65±4.36ABb
	S	347.29±29.83Aa	115.50±4.46Bb	129.07±7.21Aa
80	2M1S	116.60±30.02ABbc	49.75±1.58Ab	55.84±5.44Aab
	2M2S	87.03±11.51Bbc	62.85±9.22Aab	46.17±2.37Ab
	2M3S	147.47±27.82ABab	55.99±2.3Aab	61.03±3.96Aa
	2M4S	128.64±40.54ABabc	78.28±17.28Aa	51.61±8Aab
	M	52.98±1.99Bc	47.70±5.09Ab	27.38±1.39Bc
	S	198.16±14.8Aa	58.17±1.09Aab	52.38±0.57Aab
120	2M1S	46.31±3.55Ab	43.13±2.58Bc	40.02±1.87Bbc
	2M2S	71.62±6.11Aab	58.11±3.18ABbc	35.03±4.53BCcd
	2M3S	63.66±7.7Aab	55.04±1.43ABab	41.08±2.21Bbc
	2M4S	87.28±24.45Aa	61.82±10.54ABab	43.09±2.21Bb
	M	44.21±0.2Ab	37.15±0.7ABab	28.01±1.58Cd
	S	57.05±0.83Aab	54.25±4.15Aa	53.86±1.15Aa

注:表中数据为平均值±标准误。同列不同数字后面的小写和大写字母分别表示同一雨强下处理间差异显著( $p < 0.05$ )和极显著( $p < 0.01$ )。下同。

表 2 间作不同行比配置对入渗时间的影响方差分析

Table 2 Analysis of variance of the impact of different row ratio configurations on infiltration time s

雨强/ (mm · h <sup>-1</sup> )	处理	坡度		
		10°	16°	22°
40	2M1S	273.73±77.45Aab	261.73±25.17Aa	236.81±21.12Aa
	2M2S	316.9±27.31Aab	230.33±9.04Aa	220.84±15.28Aa
	2M3S	216.81±33.53Ab	236.88±16.34Aa	212.34±45.13Aa
	2M4S	381.66±46.28Aa	306.93±47.21Aa	292.74±76.41Aa
	M	283.41±12.2Aab	284.16±22.51Aa	267.22±3.42Aa
	S	209.66±11.04Ab	279.15±21.15Aa	213.20±3.13Aa
80	2M1S	144.07±47.7Aa	187.18±13.18Aa	181.75±15.62Aab
	2M2S	166.14±9.15Aa	128.47±6.38Cb	135.57±10.11Ab
	2M3S	134.11±45.4Aa	178.83±17.89ABa	182.07±18.68Aab
	2M4S	154.92±7.33Aa	180.07±11.71ABa	210.15±41.39Aa
	M	122.42±5.73Aa	143.16±5.22ABCb	174.64±4.31Aab
	S	76.84±0.6Aa	135.90±6.35BCb	166.65±6.04Aab
120	2M1S	156.67±3.77Aa	163.79±19.24Aa	161.59±12.99ABa
	2M2S	132.22±3.08ABab	132.23±5.87Aab	117.26±16.42BCb
	2M3S	143.29±15.96Aab	155.54±7.53Aab	118.83±6.13BCb
	2M4S	148.92±6.96Aa	160.32±11.13Aa	160.66±21.7ABa
	M	114.88±2.39ABbc	127.78±0.55Ab	181.19±10.71Aa
	S	99.12±14.9Bc	85.03±1.2Bc	99.36±0.5Cb

2.1.3 间作不同行比配置对土壤入渗量的影响 由表 3 可知,无论坡度和种植方式如何变化,入渗量随着降雨强度的增加而增加。40 mm/h 雨强下,在坡度 10°,16°时,M 处理极显著低于 2M2S,2M1S 处理( $p<0.01$ ),同时 M 处理和 S 处理差异不显著( $p>0.05$ )。80 mm/h 雨强下,坡度 16°时,2M2S 处理较 M 处理极显著增加 70.25%( $p<0.01$ ),坡度 22°时,M 处理极显著低于 2M1S,2M2S,2M3S,S 处理( $p<0.01$ )。120 mm/h 雨强下,不同坡度 S 处理均极显著高于 M 处理( $p<0.01$ ),随

着坡度增加入渗量分别增加 55.59%,66.92%,64.51%,坡度 10°和坡度 16°间作处理中,2M2S 处理比 2M4S 处理分别显著增加 60.60%,288.02%( $p<0.05$ ),坡度 22°时,2M2S 处理比 2M4S 处理增加 75.69%。

单作大豆与单作玉米相比能显著增加入渗量,间作中随着玉米大豆行比的增加入渗量逐渐减少,且随着雨强和坡度增大趋势越明显。总体来看,2M2S 处理与其他间作处理相比显著增加了入渗量,入渗时间与其他处理相比也减少。

表 3 间作不同行比配置对入渗量的影响方差分析

Table 3 Analysis of variance of the impact of different row ratio configurations on infiltration volume		m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>		
雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	处理	坡度		
		10°	16°	22°
40	2M1S	86.95±9.08ABa	109.04±20.06Aa	42.75±3.7Aa
	2M2S	89.76±11.96Aa	92.44±7.71Aa	60.72±11.99Aa
	2M3S	29.79±8.64Cb	68.52±19.07ABab	53.39±6.65Aa
	2M4S	34.57±17.67Cb	44.49±13.41ABb	29.83±4.73Aa
	M	43.92±0.86BCb	26.45±0.21Bb	40.58±1.69Aa
	S	43.72±4.88BCb	64.43±17.47ABab	42.49±17.76Aa
80	2M1S	225.90±92.87Aa	57.50±12.17ABbc	51.65±5.47Bbc
	2M2S	185.50±76.24Aa	119.12±40.73Aa	55.91±1.71Bb
	2M3S	153.86±45.72Aa	66.34±15.05ABabc	57.66±3.69Bb
	2M4S	64.56±17.05Aa	53.08±3.85ABbc	41.42±3.51BCcd
	M	77.63±3.07Aa	35.44±0.98Bc	32.76±1.39Cd
	S	130.00±20.93Aa	99.74±2.65ABab	118.54±4.9Aa
120	2M1S	47.37±4.18Bc	144.55±22.87Ab	80.87±11.5ABbc
	2M2S	70.60±13.5Bb	201.15±25.83Aa	97.12±19.81ABab
	2M3S	55.05±2.15Bbc	77.04±14.82Bc	78.68±15.12ABbc
	2M4S	43.96±2.78Bc	51.84±3.53Bc	55.28±14.59Bbc
	M	47.36±0.82Bc	46.97±0.98Bc	45.70±0.57Bc
	S	106.65±3.99Aa	141.99±2.67Ab	128.77±15.15Aa

2.2 间作不同行比配置对地表径流量和侵蚀量的影响

2.2.1 间作不同行比配置对地表径流量的影响 由表 4 可知,无论坡度和雨强如何变化,S 处理径流量均极显著小于 M 处理( $p<0.01$ )。40 mm/h 雨强下,2M3S,2M4S 处理极显著小于 2M1S 处理( $p<0.01$ ),坡度 22°时,2M2S,2M3S,2M4S 处理与 2M1S 处理相比显著减少 23.30%,43.61%,73.99%( $p<0.05$ );随着坡度增加,S 处理与 M 处理相比显著减少 47.76%,89.20%,96.06%( $p<0.05$ )。80 mm/h 雨强下,坡度 10°时,2M2S,2M3S,2M4S 处理与 2M1S 处理相比显著减少 18.86%,67.73%,71.89%( $p<0.05$ );坡度 22°时,2M2S,2M3S,2M4S 处理与 2M1S 处理相比显著减少 32.43%,54.02%,62.49%( $p<0.05$ )。120 mm/h 雨强下,其他间作处理较 2M1S 处理均显著减少( $p<0.05$ ),坡度 10°时,2M4S 处理与 2M1S 处理相比减少 69.32%,坡度 16°和 22°时,2M3S 处理与 2M1S 处理相比分别减少 49.69%,55.06%。随

着坡度增加,S 处理与 M 处理相比显著减少 42.02%,64.68%,30.50%( $p<0.05$ )。总体来看,2M4S 处理较 M,2M1S,2M2S,2M3S,S 处理平均减少 64.23%,57.19%,31.17%,10.12%,0.36%。

随着坡度和雨强的增加,径流量也随之增加,在同一雨强下,间作处理间径流量增加幅度随着坡度的增大而减少。单作大豆的径流量显著低于单作玉米,说明大豆种植对于坡耕地地表径流量有很好的控制效果,在间作处理中表现效果相同,随着大豆行比的增加,地表径流量显著减少,且随着坡度和雨强的增大,大豆对于地表径流量的控制效果逐渐削弱。

2.2.2 间作不同行比配置对地表侵蚀量的影响 由表 5 可知,除 120 mm/h 雨强 10°坡度下,其余雨强和坡度,S 处理均显著低于 M 处理( $p<0.05$ )。在 40 mm/h 雨强下,坡度 10°时,2M3S 和 2M4S 处理极显著低于 2M1S,2M2S 处理( $p<0.01$ );坡度 16°时,2M4S 处理和

2M1S 处理相比显著减少 76.21% ( $p < 0.05$ ); 坡度 22° 时, 间作各处理间差异不显著 ( $p > 0.05$ ), 2M4S 处理和 2M1S 处理相比减少 87.64%。80 mm/h 雨强下, 2M3S, 2M4S 处理显著低于 2M1S 处理 ( $p < 0.05$ ), 随着坡度增加, 2M4S 处理与 2M1S 处理相比分别减少 91.44%, 88.30%, 80.21%。120 mm/h 雨强下, 坡度 10° 和 16° 时, 2M1S 处理极显著高于 2M2S, 2M3S, 2M4S 处理 ( $p < 0.01$ ), 坡度 22° 时, 2M4S 处理与 2M1S 处理相比极显著减少 63.52% ( $p < 0.01$ )。总体来看, 2M4S 处理较 M, 2M1S, 2M2S, 2M3S, S 处理平均减少

82.90%, 80.75%, 46.53%, 29.78%, 36.33%。

在同一坡度下, 侵蚀量随着降雨强度增加而增加, 不同处理侵蚀量的减少幅度呈先增大后减小的趋势。在同一雨强下, 随着坡度增加, 各处理间差异逐渐减小。单作大豆与间作相比, 在 40 mm/h 雨强下, 单作大豆对土壤侵蚀的控制效果优于间作, 随着雨强增大, 控制效果逐渐削弱, 如: 2M4S 处理在 120 mm/h 雨强下水土保持效果优于 S 处理。由此可以看出, 间作中玉米的种植对于高雨强下减少侵蚀量具有重要作用, 而在低雨强下, 大豆的水土保持效果更好。

表 4 间作不同行比配置对地表径流量的影响方差分析

Table 4 Analysis of variance of the impact of intercropping with different row ratios on surface runoff		m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>		
雨强/ (mm · h <sup>-1</sup> )	处理	坡度		
		10°	16°	22°
40	2M1S	118.44 ± 14.86ABCbc	145.62 ± 42.92Aa	123.95 ± 5.86Bb
	2M2S	72.13 ± 15.45CDcd	103.41 ± 7.72ABab	95.07 ± 19.26BCc
	2M3S	48.67 ± 25.08Dd	35.21 ± 3.16Bc	69.90 ± 1.23Cc
	2M4S	60.56 ± 14.37CDd	50.74 ± 18.74Bbc	32.24 ± 9.22Dd
	M	162.02 ± 3.89ABab	163.20 ± 8.99Aa	216.76 ± 0.8Aa
	S	84.64 ± 6.98CDcd	17.62 ± 1.51Bc	8.55 ± 0.26Dd
80	2M1S	317.72 ± 72.29ABb	274.79 ± 31.68Aa	540.03 ± 26.43ABa
	2M2S	257.80 ± 126.45Bbc	254.28 ± 37.73Aa	364.88 ± 75.62BCb
	2M3S	102.52 ± 16.86Bc	231.21 ± 25.07Aa	248.28 ± 26.77CDbc
	2M4S	89.32 ± 22.06Bc	194.22 ± 71.37ABa	202.58 ± 78.71CDcd
	M	526.71 ± 7.28Aa	300.32 ± 2.24Aa	648.19 ± 3.08Aa
	S	162.99 ± 9.89Bbc	52.13 ± 0.5Bb	73.52 ± 3.31Dd
120	2M1S	530.21 ± 44.61Aa	521.86 ± 105.19ABa	575.64 ± 83.83Aa
	2M2S	175.36 ± 32.29Bb	274.60 ± 40.58BCb	360.68 ± 60.5ABb
	2M3S	242.59 ± 7.96Bb	262.55 ± 69.51BCb	258.69 ± 3.12Bb
	2M4S	162.67 ± 98.26Bb	287.52 ± 89.05BCb	268.00 ± 111.55Bb
	M	526.35 ± 3.46Aa	592.85 ± 2.35Aa	631.24 ± 3.84Aa
	S	305.19 ± 1.4Bb	209.39 ± 9.56Cb	438.7 ± 4.1ABab

表 5 间作不同行比配置对侵蚀量的影响方差分析

Table 5 Analysis of variance of the impact of intercropping with different row ratios on erosion amount		kg/hm <sup>2</sup>		
雨强/ (mm · h <sup>-1</sup> )	处理	坡度		
		10°	16°	22°
40	2M1S	32.14 ± 6.6Bb	45.43 ± 14.42Bb	61.43 ± 9.91Bb
	2M2S	24.45 ± 5.61Bb	18.10 ± 5.5BCbc	37.55 ± 11.8Bb
	2M3S	6.70 ± 2.04Cc	22.25 ± 12.58BCbc	31.02 ± 9.7Bb
	2M4S	2.05 ± 0.47Cc	10.81 ± 5.1BCc	7.59 ± 2.04Bb
	M	65.29 ± 4.86Aa	157.90 ± 14.05Aa	397.13 ± 68.12Aa
	S	5.12 ± 1.47Cc	2.79 ± 0.03Cc	0.58 ± 0.02Bb
80	2M1S	583.13 ± 126.24Ab	1548.00 ± 699.6ABa	1861.21 ± 787.37Aa
	2M2S	92.53 ± 10.95Bc	212.73 ± 67.17Bb	1020.42 ± 278.97ABab
	2M3S	150.3 ± 40.4Bc	322.38 ± 96.03Bb	578.86 ± 233.08ABb
	2M4S	49.92 ± 15.49Bc	181.05 ± 21.94Bb	368.32 ± 161.47Bb
	M	820.56 ± 88.01Aa	1824.78 ± 585.27Aa	1882.28 ± 111.96Aa
	S	165.58 ± 61.74Bc	42.29 ± 7.16Bb	240.89 ± 8.75Bb
120	2M1S	1560.67 ± 302.04Aa	1902.44 ± 367.38Aa	1324.29 ± 419.18Bb
	2M2S	512.31 ± 142.84Bbc	444.44 ± 58.67Cc	848.37 ± 81.3Bbc
	2M3S	252.38 ± 72.09Bbc	407.98 ± 118.07Cc	673.23 ± 95.16Bc
	2M4S	222.88 ± 48.9Bc	391.29 ± 96.67Cc	483.11 ± 139.49Bc
	M	680.15 ± 22.71Bb	1746.54 ± 56.16ABa	2466.38 ± 175.1Aa
	S	409.66 ± 17.22Bbc	1046.43 ± 293.43BCb	783.26 ± 134.21Bbc

2.3 降雨强度和坡度与水土流失的相关性分析

由表 6 可知,雨强和径流量、侵蚀量呈极显著正相关( $p<0.01$ ),和径流产生时间、入渗时间呈极显著负相关( $p<0.01$ );坡度和径流产生时间呈极显著负相关( $p<0.01$ );径流产生时间和入渗时间呈极显著

正相关( $p<0.01$ ),和径流量、侵蚀量呈极显著负相关( $p<0.01$ );入渗时间和径流量、入渗量、侵蚀量呈极显著负相关;径流量和侵蚀量呈极显著正相关( $p<0.01$ )。由此可知,雨强是影响水土流失的重要因素,坡度的增大也促进径流的产生,减少入渗流的产生。

表 6 降雨强度和坡度与水土流失的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between rainfall intensity and slope and soil erosion							
项目	雨强	坡度	径流产生时间	入渗时间	径流量	入渗量	侵蚀量
雨强	1						
坡度	0	1					
径流产生时间	-0.598**	-0.475**	1				
入渗时间	-0.788**	0.02	0.568**	1			
径流量	0.650**	0.157	-0.565**	-0.493**	1		
入渗量	0.263	-0.215	-0.07	-0.411**	0.043	1	
侵蚀量	0.544**	0.266	-0.519**	-0.391**	0.858**	-0.054	1

注:\*表示  $p<0.05$ ; \*\*表示  $p<0.01$ 。

3 讨论

许多研究表明:间作群体对土壤侵蚀有阻控效应,但间作种植模式行比配置对水土流失控制效果缺乏探讨,本研究从玉米间作大豆不同行比入手,探讨间作不同行比在不同坡度和雨强下对坡耕地水土流失的影响。结果表明:玉米间作大豆不同行比配置对坡耕地水土流失有显著影响。间作处理中,随着玉米大豆行比的增加,地表径流产流时间得到有效延缓,地表径流量和侵蚀量呈逐渐减少的趋势。研究表明,间作中随着玉米大豆行比的增加地表覆盖度随之增加<sup>[19]</sup>,而作物覆盖是控制土壤侵蚀的主要措施,较高的地表覆盖能直接拦截降雨产生的水流,增加雨水入渗<sup>[20]</sup>,同时根系改变土壤结构影响土壤水分入渗和土壤侵蚀<sup>[21]</sup>,因此间作适宜的行比配置对水土流失有很好的阻控作用<sup>[22]</sup>。另外大豆单作与玉米单作相比能显著降低地表径流量和侵蚀量,加快雨水下渗速度,增加入渗量,这与相关研究结果一致<sup>[23]</sup>,即大豆与玉米相比有更好的降雨拦截能力,能延缓地表径流产生时间,对水土流失有很好的控制作用。可能是因为大豆植株低矮,地表覆盖更高,能有效减少雨滴的动能,使得入渗量增加、地表径流量和侵蚀量减少<sup>[24]</sup>。同时前人研究发现,植被分层数增加后,植被中高位冠层(如玉米)首先受到雨水冲击,然后低位冠层(如大豆)进一步拦截雨滴<sup>[25]</sup>,削弱雨水动能,在一定程度上解释了本试验中间作条件下水土流失量低于单作的结果。

大豆和玉米的水土保持效果受不同坡度和雨强的影响,使得玉米间作大豆不同行比间对水土流失的控制效果不同。导致坡耕地水土流失的影响因素中,

降雨是引起地表径流的动力来源<sup>[26]</sup>,降雨强度影响着地表径流量和土壤侵蚀的程度。本试验中降雨强度和径流量、侵蚀量呈极显著的正相关关系( $p<0.01$ ),当降雨强度增加,无论种植模式如何改变,地表径流量和土壤侵蚀量均有不同程度增加。可能是因为高强度降雨条件下植株叶片对雨滴的抵挡效果减弱,雨水快速汇集,地表径流快速产生导致严重的坡面水流冲刷,易使集中流和沟蚀产生<sup>[27]</sup>。但降雨强度和入渗量相关关系不显著( $p>0.05$ ),可能是因为作物的地表覆盖度、土壤饱和含水量,以及大豆和玉米根系在土壤中分布层次不同,对于入渗流的产生具有较大的影响,使得降雨强度对入渗流的影响削弱。作物多样性种植群体中植被不仅提高了覆盖度,而且不同植被彼此的耦合影响了对水土流失的控制效果<sup>[28]</sup>,使得不同雨强下对水土流失的影响不同,如:在 40 mm/h 降雨强度下,2M4S 处理和 S 处理侵蚀量差异不显著( $p>0.05$ ),但在 120 mm/h 降雨强度下,2M4S 处理侵蚀量显著低于 S 处理( $p<0.05$ ),体现出高强度降雨下,玉米植株对雨滴的阻挡能力更强。且玉米间作大豆种植模式下随着玉米大豆行比的增加,低强度降雨条件下间作不同行比配置间土壤侵蚀差异更显著,高强度降雨条件下间作不同行比配置间土壤侵蚀差异减小。

坡度影响降雨入渗的时间和坡面径流的流速,前人研究表明,随着坡度增加,地表径流量产生时间缩短,入渗时间延长,径流量和侵蚀量增大,而入渗量减少<sup>[29-30]</sup>,坡度的增大促进了坡耕地水土流失。与本试验研究结果相同,坡度和地表径流产生时间呈极显著负相关,随着坡度增大,地表径流量和侵蚀量增大,入渗流减少,地表径流产生时间变化幅度减小,但随着

雨强的增大,促进集中流产生,使得坡度对地表径流产流时间的影响削弱。由于大豆是覆盖度较高的作物,大豆单作的水土保持效果在不同坡度下都有较好的体现,40 mm/h 雨强下,随着坡度的增加大豆单作地表径流量和侵蚀量均降低,80 mm/h 和 120 mm/h 雨强下随着坡度增加地表径流量和侵蚀量增加幅度较玉米单作有所削弱,在间作中也有此趋势,间作中随着玉米大豆行比的增加,侵蚀量因坡度增加引起的变化幅度遭到削弱。然而本研究采用微型径流小区人工模拟降雨进行,作物种植面积有限,且未达到自然降雨条件,若在大面积坡耕地上进行多年自然降雨试验,玉米间作大豆不同行比对水土流失的阻控效果还需进一步研究证实。

## 4 结论

(1) 坡耕地单作种植模式中,大豆单作较玉米单作土壤侵蚀控制效果更好;玉米间作大豆种植模式中,随着玉米大豆行比的增加,间作中地表径流量和侵蚀量均减少,玉米/大豆 2:4 间作较其他处理地表径流量减少 0.36%~64.23%、侵蚀量减少 29.78%~82.90%,具有较好的水土保持效果。

(2) 土壤侵蚀随着坡面和雨强的增加而增加,雨强对水土流失的影响较坡度更大。低雨强下,大豆单作较玉米间作大豆、玉米单作水土保持效果更好,随着雨强增大,大豆的水土保持效果削弱,玉米间作大豆较大豆、玉米单作水土保持效果更好。

### 参考文献(References):

- [1] 国土资源部,国家统计局.关于第二次全国土地调查主要数据成果的公报[J].资源与人居环境,2014(1):15-17.  
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics. Communique on the main data results of the second national land survey[J]. Resources and Habitant Environment, 2014(1):15-17.
- [2] 郑海金,王辉文,杨洁,等.地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J].中国水土保持,2015(2):36-39,69.  
Zheng H J, Wang H W, Yang J, et al. Summary of study on influence of surface runoff and subsurface flow to loss of nitrogen and phosphorus of slope farmland[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(2):36-39,69.
- [3] 李锐,上官周平,刘宝元,等.近 60 年我国土壤侵蚀科学研究进展[J].中国水土保持科学,2009,7(5):1-6.  
Li R, Shangguan Z P, Liu B Y, et al. Advances of soil erosion research during the past 60 years in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(5):1-6.
- [4] 尹宝海.间作与土著 AMF 对坡耕地紫色土氮流失阻控效应与机制研究[D].昆明:云南农业大学,2017.  
Yin B H. The Effect of Native Mycorrhizal and Inter-cropping on Nitrogen Loss and Reduction Mechanism on Purple Soil Surface[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2017.
- [5] Walter M T, Gao B, Parlange J Y. Modeling soil solute release into runoff with infiltration [J]. Journal of Hydrology, 2007,347(3/4):430-437.
- [6] 欧阳斌人,吴伯志,吴开贤,等.玉米间作马铃薯及起垄的水土保持效应[J].西南农业学报,2018,31(9):1802-1810.  
Ouyang C R, Wu B Z, Wu K X, et al. Effect of ridging on soil erosion under maize and potato intercropping in southwest China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018,31(9):1802-1810.
- [7] 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):48-52,65.  
Chen X Q, Fan M P, Wang Z L, 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):48-52,65.
- [8] 张丽,张乃明,张仕颖,等.AMF 和间作对作物产量和坡耕地土壤径流氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2019,35(22):216-224.  
Zhang L, Zhang N M, Zhang S Y, et al. Effects of AMF and intercropping on crop yield and soil nitrogen and phosphorus loss by runoff on slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(22):216-224.
- [9] 王永刚,陈娟.坡耕地玉米马铃薯间作产量及水土保持效益研究[J].云南农业,2015(3):40-43.  
Wang Y G, Chen J. Study on yield and soil and water conservation benefit of maize and potato intercropping in sloping farmland[J]. Yunnan Agriculture, 2015(3):40-43.
- [10] 鄯瑞卿,孙彦君,王继红.自然降雨对黑土地表氮素养分流失的影响[J].水土保持学报,2005,19(5):69-72,116.  
Qie R Q, Sun Y J, Wang J H. Effect of nature rainfall on N nutrient and fertility in phaeozem surface[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,19(5):69-72,116.
- [11] 高林林.典型紫色土坡耕地不同施肥处理径流的氮素流失特征研究[D].四川南充:西华师范大学,2018.  
Gao L L. Study on Nitrogen Loss Characteristics of Runoff in Typical Purple Soil Slope[D]. Nanchong, Sichuan: China West Normal University, 2018.
- [12] 钱婧,张丽萍,王小云,等.人工降雨条件下不同坡长和覆盖度对氮素流失的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):6-10.  
Qian J, Zhang L P, Wang X Y, et al. Effects of different

- slope length and vegetation coverage on nitrogen loss in sloping land under artificial simulated rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(5):6-10.
- [13] 冯小杰,郑子成,李廷轩,等.暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J].中国农业科学,2018,51(4):738-749.
- Feng X J, Zheng Z C, Li T X, et al. Characteristics of nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during maize growth stage under rainstorm[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018,51(4):738-749.
- [14] Zhou Z C, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. Catena, 2007,70(3):350-355.
- [15] Henry A, Kleinman P J A, Lynch J P. Phosphorus runoff from a phosphorus deficient soil under common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and soybean (*Glycine max* L.) genotypes with contrasting root architecture [J]. Plant and Soil, 2009,317(1):1-16.
- [16] 张志兰,范志伟,王永刚,等.玉米马铃薯间作系统中玉米的恢复性生长[J].西南农业学报,2018,31(2):284-288.
- Zhang Z L, Fan Z W, Wang Y G, et al. Restorative growth of maize in maize and potato intercropping system[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018,31(2):284-288.
- [17] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005,29(2):189-217.
- [18] 赵桂茹,安瞳昕,欧阳铖人,等.青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):72-79.
- Zhao G R, An T X, Ouyang C R, et al. Impact of nitrogen input of silage maize on soil erosion and water-stable aggregates in sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):72-79.
- [19] 封亮,王淑彬,杨文亨,等.红壤旱地玉米大豆间作模式对大豆农艺性状和产量的影响[J].大豆科学,2020,39(6):882-890.
- Feng L, Wang S B, Yang W T, et al. Effects of maize soybean intercropping patterns on soybean agronomic characters and yield in upland red soil [J]. Soybean Science, 2020,39(6):882-890.
- [20] El Kateb H, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. Catena, 2013,105:1-10.
- [21] 王婷,王强学,李永梅,等.玉米大豆间作对作物根系及土壤团聚体稳定性的影响[J].云南农业大学学报:自然科学,2021,36(3):507-515.
- Wang T, Wang Q X, Li Y M, et al. Effect of maize and soybean intercropping on root system and soil aggregate stability[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2021,36(3):507-515.
- [22] Lin Y M, Cui P, Ge Y G, et al. The succession characteristics of soil erosion during different vegetation succession stages in dry-hot river valley of Jinsha River, upper reaches of Yangtze River[J]. Ecological Engineering, 2014,62:13-26.
- [23] 马志鹏,范茂攀,陈小强,等.间作模式下作物根系与坡耕地红壤抗蚀性的关系[J].水土保持学报,2016,30(4):68-73.
- Ma Z P, Fan M P, Chen X Q, et al. Study on root system and red soil anti-erodibility of slope farmland under intercropping of maize and soybean[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):68-73.
- [24] Hou J, Wang H Q, Fu B, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns[J]. Catena, 2016,147:632-637.
- [25] Fan Z, An T, Wu K, et al. Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff [J]. Agricultural Water Management, 2016,166:9-16.
- [26] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. Catena, 2019,173:494-504.
- [27] 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.
- [28] 张晓云,郎凤莲,李永贤,等.坡地玉米马铃薯间作群体地上部垂直层化对水土流失的影响[J].云南农业大学学报:自然科学,2017,32(5):903-911.
- Zhang X Y, Lang F L, Li Y X, et al. Effects of vertical stratification on the soil and water loss of maize and potato intercropping on sloping land [J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2017,32(5):903-911.
- [29] 郭燕虹,张丽萍,邓龙洲,等.坡面氮素流失的坡度和雨强效应模拟研究[J].水土保持学报,2018,32(2):27-33.
- Wu Y H, Zhang L P, Deng L Z, et al. Effects of slope gradient and rainfall intensity on nitrogen loss under artificial simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):27-33.
- [30] Brivois O, Bonelli S, Borghi R. Soil erosion in the boundary layer flow along a slope: A theoretical study [J]. European Journal of Mechanics B: Fluids, 2007,26(6):707-719.