

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.010

周云,黎建强,高朗,等.林下三七不同管理措施对坡面产流产沙和土壤特性的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):20-30.

ZHOU Yun, LI Jianqiang, GAO Lang, et al. Effects of different management measures of cultivation *Panax notoginseng* under forest on runoff and sediment yield and soil characteristics on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 20-30.

林下三七不同管理措施对坡面产流产沙和土壤特性的影响

周云,黎建强,高朗,李京豪,刘方严,刘艳娇,晏慧颖,赵思倩,杨舒媛

(西南林业大学水土保持学院,昆明 650224)

摘要: [目的] 揭示不同管理措施对三七 [*Panax notoginseng* (Burkill) F. H. Chen] 林地产流产沙和土壤特性的影响,为科学防控林下三七种植的水土流失提供理论依据。[方法] 采用野外径流小区原位观测试验,于 2022 年雨季对不同坡度(5°,10°,15°)自然林地(CK)、林下整地(SP)、无棚三七林地(NC)、有棚三七林地(HC)的产流产沙量进行量化,探究不同管理措施对三七林地坡面产流产沙及土壤特性的影响。[结果] (1)2022 年寻甸县降雨总量为 1 031.70 mm,属平水年份。林外和林内累计侵蚀性降雨量分别为 845.40,565.60 mm,林冠截留率为 9.97%~67.38%。(2)各管理措施三七林地产流产沙存在极显著差异($p<0.01$)。与 CK 相比,SP、NC 和 HC 平均总径流量分别增加 272.23%,171.19%和 106.89%,平均总产沙量分别增加 385.15%,248.82%和 138.84%;三七林地布设雨棚有较好的减沙效果。(3)CK、SP 的土壤特性分别与其他管理措施三七林地土壤特性存在显著差异;NC 和 HC 的平均几何直径和土壤抗冲系数存在显著差异($p<0.05$),其他土壤特性无显著差异;主成分分析显示,不同管理措施三七林地土壤饱和导水率、枯落物储量、土壤体积质量和 K 值对产流产沙的影响较大。(4)各管理措施三七林地次降雨产流产沙量和降雨量或降雨侵蚀力与降雨强度之间呈显著幂函数关系($p<0.05$);总径流量和总产沙量与坡度呈极显著指数关系($p<0.01$), $R^2>0.90$;且产流产沙量随着坡度增加,流失增幅越大。[结论] 林下整地和林下种植三七导致水土流失显著增加,但最大土壤流失量[34.53 t/(km²·a)]远低于西南岩溶区土壤容许流失量。建议在缓坡林地种植三七,且可通过搭建遮雨棚和改善土壤特性来缓解水力侵蚀。

关键词: 林下三七; 不同管理; 产流产沙; 降雨特征; 土壤特性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)05-0020-11

Effects of Different Management Measures of Cultivation *Panax notoginseng* Under Forest on Runoff and Sediment Yield and Soil Characteristics on Slope

ZHOU Yun, LI Jianqiang, GAO Lang, LI Jinghao, LIU Fangyan,

LIU Yanjiao, YAN Huiying, ZHAO Siqian, YANG Shuyuan

(College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] Revealing the effects of different management measures on runoff and sediment yield and soil characteristics of [*Panax notoginseng* (Burkill) F. H. Chen] forest land, can provide a theoretical basis for scientific prevention and control of soil erosion in understory *P. notoginseng* cultivation. [Methods] The in-situ observation experiment of field runoff plot was used to quantify the sediment yield of natural forest land (CK), forest prepared land (SP), no canopy *P. notoginseng* forest land (NC), and canopy *P. notoginseng* forest land (HC) at different slopes (5°, 10°, 15°) in the rainy season of 2022, to explore the effects of different management measures on the runoff and sediment yield and soil characteristics of *P. notoginseng* forest land slope. [Results] (1) The total rainfall in Xundian County in 2022 was 1031.70 mm, which belonged to a flat year. The cumulative erosive rainfall outside and inside the forest was 845.40 and

收稿日期: 2024-03-27

修回日期: 2024-05-10

录用日期: 2024-06-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-08-08

资助项目: 昆明市科技“揭榜挂帅制”项目(2021-J-H-002-02); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项(XDYC-QNRC-2022-0205); 云南省科技特派团创新引导与科技型企业培育计划项目(202204BI090003); 国家自然科学基金项目(32060345)

第一作者: 周云(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: Y-Zhou8@hotmail.com

通信作者: 黎建强(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: JQ-Lee83125@hotmail.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

565.60 mm, Canopy interception rates ranged from 9.97% to 67.38%. (2) There were extremely significant ($p < 0.01$) differences in runoff and sediment yield of *P. notoginseng* forest land under different management measures. Compared with CK, the average total runoff of SP, NC, and HC increased by 272.23%, 171.19%, and 106.89%, respectively, and the average total sediment yield increased by 385.15%, 248.82%, and 138.84%, respectively. With the increase of slope, the loss increased more significantly. The canopy in *P. notoginseng* forest has a good effect on sediment reduction. (3) Soil characteristics of CK and SP were significantly different from those of other management measures; There were significant differences in the mean geometric diameter and soil anti-scour coefficient between NC and HC ($p < 0.05$), but no significant differences in other soil characteristics. Principal component analysis showed that soil saturated water conductivity, litter storage, soil bulk density and K value of cultivation *P. notoginseng* forest had great effects on sediment yield. (4) There was a significant power function relationship between event runoff and sediment yield in the *P. notoginseng* forest land and rainfall or rainfall erosivity and rainfall intensity ($p < 0.05$); total runoff and sediment yield showed a significant positive exponential relationship with slope ($p < 0.01$), $R^2 > 0.90$. With the increase of slope, the loss of sediment increased more. [Conclusion] Forest land preparation and *P. notoginseng* cultivation led to a significant increase in soil erosion, but the maximum soil loss [34.53 t/(km² · a)] was far lower than the allowable soil loss in karst area of southwest China. It is recommended to cultivate *P. notoginseng* in gentle slope forest land, and hydraulic erosion can be alleviated by building canopy and improving soil characteristics.

Keywords: *Panax notoginseng* under the forest; different management; runoff and sediment yield; rainfall characteristics; soil characteristics

Received: 2024-03-27

Revised: 2024-05-10

Accepted: 2024-06-10

Online(www.cnki.net): 2024-08-08

农林生态系统中降雨-地表径流引起的土壤侵蚀已成为全球关注的生态环境问题。目前,我国水力侵蚀规模和强度持续“双减少”的局面,2022年全国水土流失面积共计 265.34×10^4 km²,水力侵蚀面积约占 41.10%^[1]。水力侵蚀不仅造成土地质量的退化和洪涝灾害的加剧,侵蚀泥沙及其流失养分还直接或间接对水体产生污染,从而限制地方经济的发展^[2]。全球气候变化和土地利用方式改变明显影响不同气候区域的水土流失,进一步还受到耕作方式和管理措施的影响^[3]。

三七 [*Panax notoginseng* (Burkill) F. H. Chen] 作为我国名贵中药材,云南省是其主产地和原产地,但因三七连作障碍突出和农田大水大肥的种植模式,导致可供重复种植的农田有限及三七品质下降。而林下三七生态种植模式有效缓解与粮争地的矛盾,提高三七的品质和药效^[4]。加之云南省得天独厚的森林资源、地理环境及气候条件,为绿色三七产业的可持续发展提供重要保障。前期林下种植三七的研究大多涉及提高三七产量与品质^[5],以及林下种植三七所带来的经济效益,关于林下三七种植的水土流失研究较少。云南省属于我国水土流失二级敏感区,雨水充沛且土壤抗蚀性能较差。林下三七种植使

林地土地利用方式发生变化,导致林地的地表覆盖和土壤结构特性改变,从而影响林地的水力侵蚀过程。因此,了解林下三七种植产流产沙的机理对药物资源与森林资源永续利用显得迫切而重要。

土壤侵蚀受降雨特征、土壤特性、管理因子、坡度等因素影响,现有的大部分土壤侵蚀研究仅限于农田,采用模型(USLE、RUSLE、WEPP等)^[6-7]或径流小区监测探究土壤管理因子和水土保持措施^[8]对土壤侵蚀的影响。全球气候变化背景下,频繁且多变的自然降雨决定亚热带林下土壤容易在水力侵蚀过程中流失。已有学者^[9]证实,不同降雨的雨量、强度及降雨历时等因子差异显著影响坡面产流产沙规律。除降雨因子外,土壤作为降雨的承受体,土壤类型、土壤结构组成等^[10]直接影响土壤入渗性能与抗蚀性,进而影响坡面侵蚀过程。不同管理措施对坡面侵蚀的调控机理不一,其产流产沙对各管理的植被格局、土壤特性的响应特征存在差异。林下三七种植在雨季期间搭建雨棚不但能有效防治圆斑病,调节小气候^[11],还改变林地降雨产流过程。而林下种植三七时不同管理措施在自然降雨下产流产沙过程和侵蚀调控机制尚不清楚,仍需掌握更多实测资料进行进一步的探究。

鉴于此,本研究在自然降雨条件下,量化和对比不同管理(自然林地、林下整地、无棚三七林地、有棚三七林地)措施三七林地的径流量、产沙量和土壤特性,旨在阐明不同管理措施对三七林地产流产沙和土壤特性的影响,以期为林下种植三七的水土保持生态建设及可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市寻甸县云南农业大学林下三七种植试验示范基地(103°12′45″E,25°28′16″N),三七种植林地总面积约 50 hm²。该区属亚热带季风气候区,雨量充沛,多年平均气温为 14.5 ℃,多年平均降水量为 1 018.8 mm,降雨主要集中在 6—10 月,占全年降水量约 85%。该区地属金沙江支流,地势西北高,东南低,呈向东南倾斜阶梯状,河谷深切,山势陡峭,海拔为 2 100~2 270 m。区内林分类型为华山松(*Pinus armandi* Franch.)林,平均树龄 26 年,平均胸径 18.21 cm,平均树高 9.83 m。灌木层主要有褐枝短柱茶(*Camellia saluenensis* Stapf ex Bean)、火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li)、胡桃(*Juglans regia* L.)、狭叶山胡椒(*Lindera angustifolia* Cheng)和悬钩子蔷薇(*Rosa rubus* Lévl. et Vant.)等;草本层主要有土牛膝(*Achyranthes aspera* L.)、短叶水蜈蚣(*Kyllinga brevifolia* Rottb.)、阴地蕨(*Sceptridium ternatum* (Thunb.) Y. X. Lin)和铁线莲(*Clematis florida* Thunb.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 华山松林地在林下三七种植前需开展整地工作。首先,清除种植区域的小型灌木、杂草、枯枝落叶;接着,用小型旋耕机旋耕 2~3 次,深度为 20~30 cm,期间要避免旋到非耕作层土壤;最后,在林地等高起垄(图 1),起垄的同时每隔 15~20 m 留 1 个排水口作为防洪沟渠。整地之后,于 2020 年 1 月初,将 1 年生三七苗按 10~15 cm×10~15 cm 的株行距移栽到垄上,并用清杂时收集的松针按厚度 2~5 cm 覆盖在垄面。种植期间,雨季需要搭建遮雨棚,预防病害发生,遮雨棚为无色聚乙烯材质的不透水拱棚。三七种植前施农家肥作为底肥,种植期间不使用化肥和农药。此次试验为种植第 3 年,三七覆盖度约 55%。

本研究基于野外径流小区原位观测试验,以立地条件相对一致、未被干扰的华山松林地(自然林地)为对照,设置自然林地(CK)、林下整地(SP)、无棚三七林地(NC)、有棚三七林地(HC)4 个管理措施,各管理措施分别设置 5°,10°和 15°坡度水平。于 2022 年

雨季(6—10 月)对各管理措施三七林地的产流产沙进行观测。CK 小区规格为 20 m×5 m。为保证其他管理措施三七林地排水单元的完整性,其他小区规格为 20 m×15 m。供试土壤为黄褐色土壤,不同管理措施三七林地基本概况见表 1。

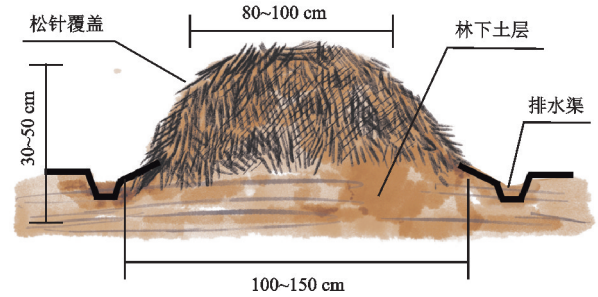


图 1 三七林地等高起垄示意

Fig.1 Ridge of contour in *P. notoginseng* forest

表 1 不同管理措施三七林地基本概况

Table 1 Basic situation of *P. notoginseng* forest land under different management

小区	管理措施	乔木层覆	灌木层覆	草本层覆	树木密度/ (株·hm ⁻²)
		盖度/%	盖度/%	盖度/%	
CK	自然林地	78.3	30	35	1 146
SP	林下整地	78.3	0	0	1 145
NC	无棚三七林地	78.4	0	55	1 146
HC	有棚三七林地	78.4	0	55	1 145

1.2.2 野外观测与实验室分析

(1)土壤特性测定 雨季前,在各管理措施三七林地内分别设置 3 块 20 m×20 m 标准样地,每个标准样地设置 3 个采样点,分别采集枯落物、土壤(0—10 cm)样品。其中 SP、NC 和 HC 分别于垄上和垄下各设置 3 个采样点。枯落物收集样方规格为 50 cm×50 cm;采用烘干称量法计算枯落物储量(LR);采用定水头法测定土壤饱和导水率(K₀);采用环刀法测定土壤体积质量(BD)、总孔隙度(P₃);采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质(SOM);采用干筛和湿筛法测定>0.25 mm 机械稳定性团聚体(MSA)和>0.25 mm 水稳性团聚体(WSA),得到团聚体破坏率(DAS),同时计算湿筛的平均质量直径(D_{MW})和平均几何直径(D_{MG});采用激光粒径仪测定黏粒、粉粒和砂粒,并计算土壤可蚀性因子(K);用自制环刀(20 cm×10 cm×5 cm)取原状土,采用原状土冲刷水槽法测定土壤抗冲系数(AS)。因考虑到实测研究区土壤结构级别和土壤渗透级别等土壤理化属性的条件有限,故本次研究采用 EPIC 模型的 K 值估算方法。D_{MW}、D_{MG}、DAS、AS^[12]和 K^[13]计算公式为:

$$D_{MW} = \sum_{i=1}^m w_i x_i \tag{1}$$

$$D_{MG} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m \tau w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^m \tau w_i} \right) \quad (2)$$

$$DAS = \frac{MSA - WSA}{MSA} \times 100\% \quad (3)$$

$$AS = (Qt)/M \quad (4)$$

$$K_{EPIC} = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 N_3 \times (1 - N_2/100)]\} \times [N_2 / (N_1 + N_2)]^{0.3} \times \{1 - 0.25C / [C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} \times \{1 - 0.7SN / [SN + \exp(-5.51 + 22.9SN)]\} \quad (5)$$

$$K = 0.1317 K_{EPIC} \quad (6)$$

式中: τw_i 为第*i*粒径团聚体组分的质量占土壤总质量的质量百分比(%); x_i 为第*i*粒径团聚体组分的平均直径(mm); AS 为土壤抗冲系数(L/g); M 为冲走的土样质量(g); t 为冲刷时间(min); Q 为冲刷流量(L/min)。抗冲试验前将原状土样浸水24 h至土壤样品水饱和,沥去多余重力水后置于1.2 m×0.1 m冲刷槽内。冲刷坡度设为15°,冲刷流量为2 L/min,每隔1 min取1次冲刷水沙混合样,共取10次。将水沙混合样烘干后称取泥沙质量。 K_{EPIC} 单位是美国制($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{hm}^2)$),需将美国制单位 K_{EPIC} 值乘以0.1317,转化为 K 国际单位($t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}) / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$),本文统一采用国际制单位; N_1 、 N_2 、 N_3 和 C 分别为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2.00 mm)质量分数和土壤有机质质量分数(%); $SN=1-N_3/100$ 。

(2)降雨观测与分析 采用自记式雨量计(美国, Onset HOBO RG3-M)分别在径流小区附近和研究区林外对林内和林外次降雨的降雨量(RA)进行观测,同时对林外次降雨的平均降雨强度(I_m)、5 min最大降雨强度(I_5)、30 min最大降雨强度(I_{30})、60 min最大降雨强度(I_{60})进行观测,每次的降雨侵蚀力(EI_{30})根据WISCHMEIER等^[14]的公式计算,具体计算公式为:

$$e = 0.11897 + 0.0873 \lg i \quad (7)$$

$$E = \sum e \cdot P \quad (8)$$

$$EI_{30} = E \cdot I_{30} \quad (9)$$

式中: i 为某降雨强度较为平均的时段的降雨强度(mm/h); e 为该时段单位降雨动能 $[\text{MJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})]$; P 为每一时段的降雨量(mm); E 为次降雨总动能 (MJ/hm^2) ; EI_{30} 为次降雨侵蚀力 $[(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$ 。

(3)产流产沙样品采集与测定 每次侵蚀性降雨后,对集水池内水位进行测量,精确到0.10 cm,计算径流量(RH);再将集水池内径流泥沙充分搅匀,用625 mL聚氯乙烯瓶取3瓶混合样品,当天带回实验

室,静置后倒掉上清液,剩余混合样品进一步烘干、称重用于产沙量(SLR)计算。

1.2.3 数据处理 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同管理措施对土壤特性的影响;采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验不同管理措施、坡度以及两者交互作用对径流量、泥沙量的影响;采用独立样本 T 检验分析不同管理措施和坡度总径流量、产沙量的差异;采用Pearson相关分析分析降雨特征和土壤特性与水土流失的相关性;采用主成分分析影响水土流失的主要土壤特性指标;采用回归分析评价降雨特征、坡度与水土流失的关系。以上数据处理与统计分析均在Office Excel 2016和SPSS 20.0软件完成,并在Photoshop和Origin 2021软件完成制图。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

2022年寻甸县全年降雨总量为1 031.70 mm,比多年平均降雨量多12.90 mm,属平水年份。观测期间(6—10月),侵蚀性降雨共计13场次,林外和林内累计侵蚀性降雨量分别为845.40、565.60 mm,分别占全年降雨总量的81.94%和66.90%,林冠截留率为9.97%~67.38%。8月降雨量达到最大值,为126.20 mm,10月降雨量达到最小值,为22.80 mm。产流产沙所需的最小降雨量为12.20 mm。观测期内, EI_{30} 、 I_m 、 I_5 、 I_{30} 和 I_{60} 都具有明显的时间动态变化(图2)。单次 EI_{30} 为16.94~437.35 $(\text{MJ} \cdot \text{mm})/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$, I_m 为2.57~26.97 mm/h, I_5 、 I_{30} 和 I_{60} 分别为16.80~110.40、6.80~45.20、5.60~23.60 mm/h。依据降雨量等级划分标准^[15],历次降雨事件中发生大雨、暴雨和大暴雨的次数分别占总降雨次数的23.08%、61.54%和7.69%。

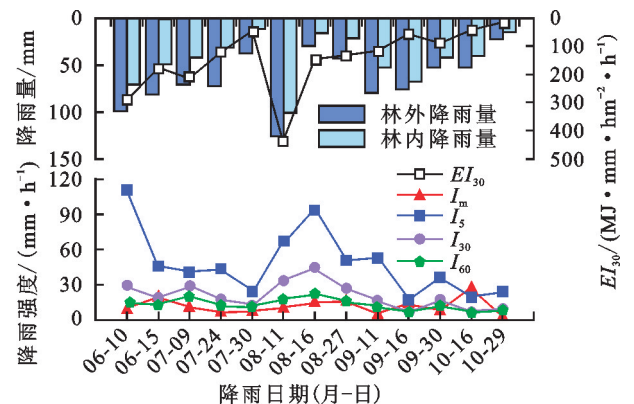


图2 研究区降雨特征

Fig. 2 Rainfall characteristic map of study site

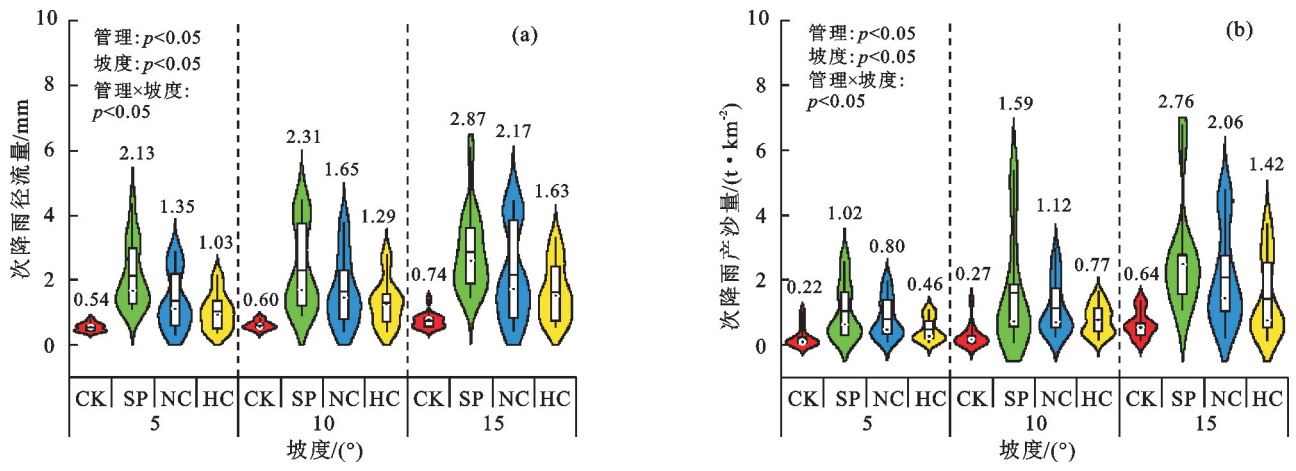
2.2 不同管理三七林地产流产沙特征

不同管理措施三七林地次降雨径流量和产沙量存在显著差异($p < 0.05$)。次降雨条件下,CK和SP径流量变化分别为0.36~1.41、0.87~6.11 mm;NC和HC径流量变化分别为0.39~4.46、0.37~3.34 mm;CK和SP

产沙量发分别为 0.01~1.36,0.07~6.78 t/km²,NC 和 HC 产沙量分别为 0.10~4.77,0.06~3.76 t/km²。同一坡度条件下,不同管理措施三七林地次降雨径流量和产沙量由大到小依次为 SP>NC>HC>CK,并且同一管理措施三七林地次降雨径流量和产沙量随坡度的增加而增大(图 3)。5°坡面,与 CK 相比,SP、NC、HC 的次降雨产流量分别增加 1.59,0.81,0.49 mm,SP、NC、HC 的次降雨产沙量增加 0.80,0.58,0.62 t/km²;15°

坡面,与 CK 相比,SP、NC、HC 的次降雨产流量增加 2.13,1.43,0.89 mm,SP、NC、HC 的次降雨产沙量增加 2.12,1.42,0.78 t/km²。

总体而言,相较于 CK 的单次径流量平均值 0.63 mm,SP、NC、HC 的单次径流深平均值分别是其 3.86,2.73,2.07 倍;相较于 CK 单次产沙量平均值 0.37 t/km²,SP、NC、HC 单次产沙量平均值分别是其 4.84,3.57,2.38 倍。



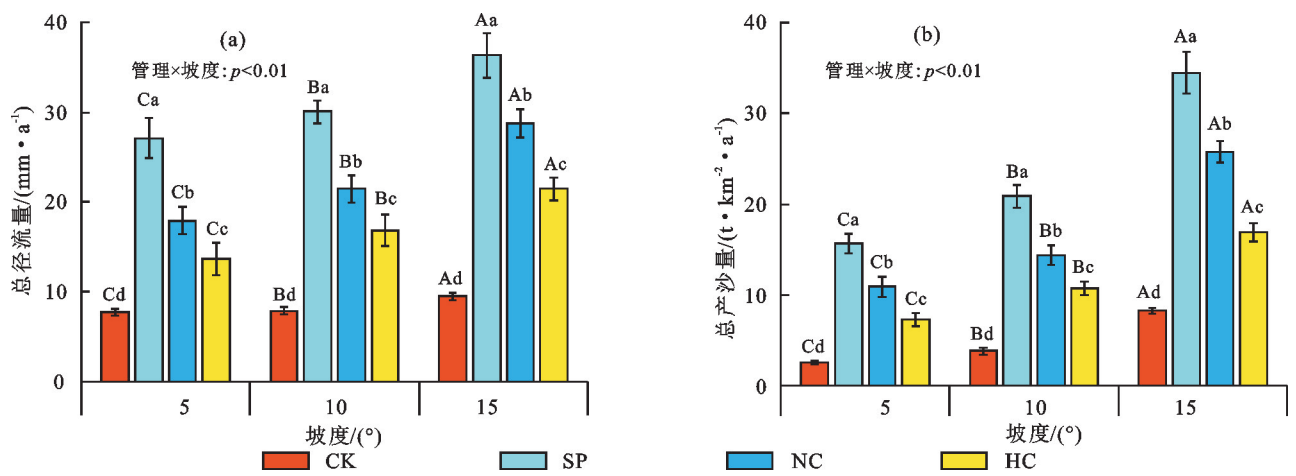
注:图中数据表示平均值。

图 3 不同管理措施三七林地次降雨径流量和产沙量

Fig. 3 Event runoff and sediment of *P. notoginseng* forest land under different management

不同管理措施三七林地之间总径流量、总沙量差异极显著($p<0.01$),并随着坡度增大呈增加趋势(图 4)。CK 的平均总径流量为 8.37 mm/a,SP、NC、HC 的平均总径流量分别是其 3.72,2.71,2.07 倍,CK 的平均总产沙量为 4.88 t/(km²·a),SP、NC、HC 的平均总产沙量分别

是其 4.85,3.49,2.39 倍。其中以 SP 的 15°坡面产流产沙量最大,分别为 36.32 mm/a 和 34.53 t/(km²·a);以 CK 的 5°坡面产流产沙量最小,分别为 7.69 mm/a 和 2.53 t/(km²·a)。统计分析显示,不同管理、坡度及二者的交互作用对径流量和产沙量均有极显著影响($p<0.05$)。



注:不同大写字母表示同一管理措施,不同坡度总径流量或总产沙量差异在 $p<0.01$ 水平上显著;不同小写字母表示同一坡度,不同管理措施总径流量或总产沙量的差异在 $p<0.05$ 水平上显著。

图 4 不同管理措施三七林地总径流量和产沙量

Fig. 4 Total runoff and sediment of *P. notoginseng* forest land under different management

2.3 不同管理措施三七林地土壤特性

从表 2 可以看出,不同管理措施三七林地土壤特性存在差异。在枯落物储量、土壤体积质量、总孔隙

度方面,CK 与其他 3 种管理措施林地间存在显著差异 ($p<0.05$),而 SP、NC、HC 之间无显著差异。CK 的枯落物储量和总孔隙度分别为 14.97 t/hm² 和 57.95%,均显

著高于其他管理措施林地 ($p < 0.05$); CK 的枯落物储量分别是 SP、NC 和 HC 的 3.97, 3.40, 3.45 倍, 总孔隙度分别是 SP、NC 和 HC 的 1.19, 1.14, 1.14 倍; 土壤体积质量规律与之相反, 与 CK 土壤体积质量 (1.14 g/cm^3) 相比, SP 土壤体积质量最高, 为 1.27 g/cm^3 。在土壤饱和导水率、 $>0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体比例、 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体比例和平均质量直径方面, CK 和 SP 分别与 NC、HC 间存在显著差异 ($p < 0.05$), 而 NC、HC 之间无显著差异。土壤饱和导水率、 $>0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体比例、 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体比例和平均质量直径均表现为 CK 最大, SP 最低。关于团聚体结构

破坏率, SP 的与其他管理措施间存在显著差异 ($p < 0.05$), 表现为 SP (30.20%) 最大, CK 最低 (14.99%)。K 与土壤黏粒、粉粒、砂粒及有机质质量分数直接有关。关于 K 及土壤黏粒、粉粒、砂粒及有机质质量分数, CK、SP 分别与 NC、HC 的存在显著差异 ($p < 0.05$), 而 NC、HC 之间无显著差异。黏粒、粉粒、砂粒、有机质质量分数和 K 的最大值分别在 HC、SP、CK、CK 和 SP。各管理措施三七林地间, 平均几何直径和土壤抗冲系数存在显著差异 ($p < 0.05$)。平均几何直径和土壤抗冲系数均呈现 CK (1.14 mm , 17.29 L/g) 最大, SP (0.69 mm , 5.06 L/g) 最小。

表 2 不同管理措施三七林地土壤特性

Table 2 Soil characteristics of *P. notoginseng* forest land under different management

因素	CK	SP	NC	HC
$LR / (\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	$14.97 \pm 0.75\text{A}$	$3.77 \pm 0.02\text{B}$	$4.40 \pm 0.05\text{B}$	$4.34 \pm 0.04\text{B}$
$K_0 / \%$	$1.35 \pm 0.15\text{A}$	$0.86 \pm 0.02\text{C}$	$1.04 \pm 0.11\text{B}$	$1.08 \pm 0.09\text{B}$
$BD / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$1.14 \pm 0.15\text{B}$	$1.27 \pm 0.08\text{A}$	$1.25 \pm 0.08\text{A}$	$1.25 \pm 0.13\text{A}$
$P_3 / \%$	$57.95 \pm 4.03\text{A}$	$48.80 \pm 3.67\text{B}$	$50.78 \pm 4.35\text{B}$	$50.77 \pm 3.39\text{B}$
$\text{MSA} / \%$	$89.41 \pm 1.04\text{A}$	$85.08 \pm 4.25\text{C}$	$88.60 \pm 4.44\text{B}$	$88.71 \pm 4.23\text{B}$
$\text{WSA} / \%$	$74.42 \pm 1.32\text{A}$	$54.88 \pm 2.31\text{C}$	$72.09 \pm 3.26\text{B}$	$72.94 \pm 3.51\text{B}$
$\text{DAS} / \%$	$14.99 \pm 0.77\text{B}$	$30.20 \pm 1.21\text{A}$	$16.51 \pm 1.62\text{B}$	$15.77 \pm 1.84\text{B}$
$D_{\text{MW}} / \text{mm}$	$1.43 \pm 0.11\text{A}$	$1.07 \pm 0.02\text{C}$	$1.13 \pm 0.03\text{B}$	$1.13 \pm 0.02\text{B}$
$D_{\text{MG}} / \text{mm}$	$1.14 \pm 0.01\text{A}$	$0.69 \pm 0.01\text{D}$	$0.83 \pm 0.01\text{B}$	$0.81 \pm 0.01\text{C}$
$N_1 / \%$	$20.52 \pm 0.98\text{C}$	$21.59 \pm 0.95\text{B}$	$23.77 \pm 0.84\text{A}$	$23.87 \pm 0.91\text{A}$
$N_2 / \%$	$46.57 \pm 2.32\text{C}$	$66.86 \pm 3.17\text{A}$	$59.80 \pm 2.80\text{B}$	$56.08 \pm 2.91\text{B}$
$N_3 / \%$	$29.33 \pm 1.19\text{A}$	$11.07 \pm 0.77\text{C}$	$16.94 \pm 0.84\text{B}$	$18.32 \pm 1.08\text{B}$
$\text{SOM} / (\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$58.91 \pm 5.27\text{A}$	$36.16 \pm 2.35\text{C}$	$44.22 \pm 1.81\text{B}$	$44.12 \pm 2.21\text{B}$
$K / (\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$	$0.008 \ 3 \pm 0.000 \ 1\text{C}$	$0.013 \ 0 \pm 0.000 \ 2\text{A}$	$0.009 \ 0 \pm 0.000 \ 2\text{B}$	$0.009 \ 1 \pm 0.000 \ 2\text{B}$
$\text{AS} / (\text{L} \cdot \text{g}^{-1})$	$17.29 \pm 0.64\text{A}$	$5.06 \pm 0.15\text{D}$	$10.17 \pm 0.33\text{C}$	$12.51 \pm 0.43\text{B}$

注: 表中数据表示均值±标准差; 同行不同大写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.4 不同管理措施三七林地产流产沙与降雨特征、土壤特性和坡度间相关性分析

根据降雨和产流产沙观测结果, 选取每次的降雨量、降雨侵蚀力和降雨强度 (I_m 、 I_5 、 I_{30} 、 I_{60}) 与其次径流量和产沙量进行单因素相关性分析 (图 5a)。分析结果显示, 径流量、产沙量与降雨量和降雨侵蚀力呈极显著正相关 ($p < 0.01$); 径流量与 I_5 分别呈正相关, 无显著相关性; 产沙量与 I_5 呈极显著正相关 ($p < 0.01$); 径流量和产沙量与 I_{30} 、 I_{60} 呈正相关, 与 I_m 呈负相关, 均无显著相关性; 径流量与产沙量呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。

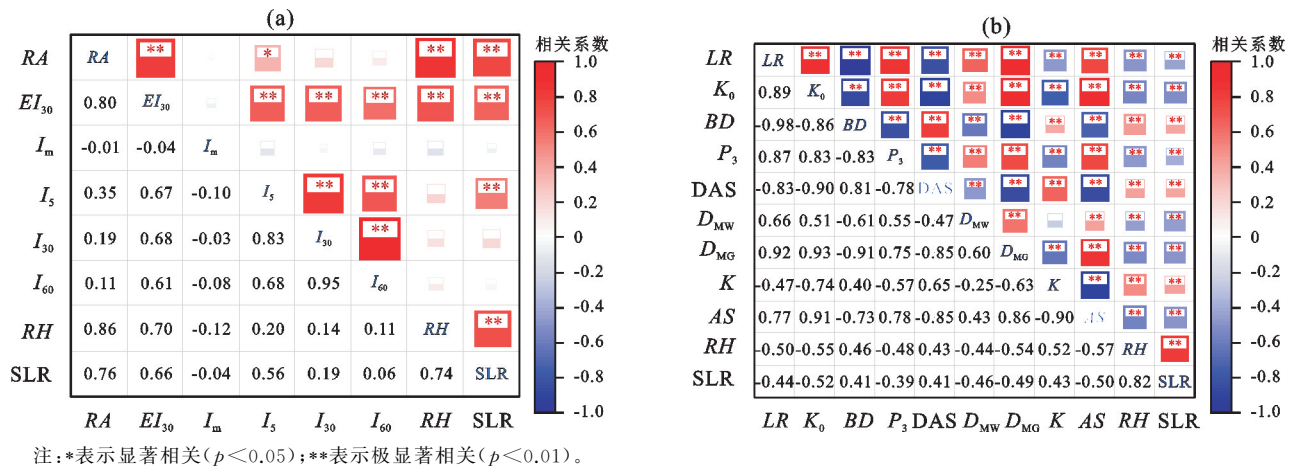
降雨量或降雨侵蚀力与降雨强度多因素综合作用对产流产沙的影响程度不同, 基于此, 本研究通过回归分析分别建立各管理措施三七林地次降雨产流产沙量与降雨量 (或降雨侵蚀力) 和降雨强度 (I_5 、 I_{30} 、 I_{60}) 的多因素关系模型, 并对各模型的 p 值和 R^2

进行比选, 选出最佳模型 (表 3)。结果显示, 各管理措施三七林地次降雨产流产沙量与降雨量或降雨侵蚀力和降雨强度之间的幂函数关系最密切, 均达到显著相关水平 ($p < 0.05$)。CK、NC、HC 小区, 径流量、产沙量与降雨量及 I_{30} 之间的复合函数相关关系较为密切, R^2 均达 0.68; SP 小区, 径流量与降雨侵蚀力及 I_{30} 之间的复合函数相关关系较为密切, R^2 为 0.74, 产沙量与降雨侵蚀力及 I_5 之间的复合函数相关关系较为密切, R^2 为 0.90。说明林下种植三七本身不改变华山松林地产流产沙与主要影响因子之间的复合函数关系, 但林下整地改变影响产流产沙的主要降雨因子。

$>0.25 \text{ mm}$ 的团聚体可通过直接影响团聚体破坏率来影响土壤可蚀性, 土壤机械组成和有机质通过直接影响 K 间接影响土壤侵蚀。径流量和产沙量与土壤特性相关性见图 5b。径流量、产沙量与枯落物

储量、土壤饱和导水率、总孔隙度、平均质量直径、平均几何直径及土壤抗冲系数呈极显著负相关($p < 0.01$)；径流量、产沙量与土壤体积质量、团聚体结构破坏率、 K 呈极显著正相关($p < 0.01$)。

0.01)；径流量、产沙量与土壤体积质量、团聚体结构破坏率、 K 呈极显著正相关($p < 0.01$)。



为进一步探明土壤特性对产流产沙的影响,将土壤特性指标与产流产沙量进行主成分分析,结果显示,对产流产沙产生影响的土壤特性主成分中前 2 个的特征值大于 1,特征值分别为 8.16,1.27(图 6a)。2 个主成分的方差累积贡献率为 85.72%。主成分 1 主要综合 K_0 和 LR ,相应的因子荷载值分别为 0.339, 0.335,方差贡献率最大(74.20%),故主成分 1 对水土流失影响最大;主成分 2 主要综合 BD 和 K ,相应的载荷值依次为-0.239,0.227,方差贡献为 11.52%;CK 和 SP 的土壤特性分别与其他管理措施林地的土壤特性发生明显的区分,同时 NC 和 HC 的土壤特性部分重叠(图 6b)。

采用回归分析对不同管理措施三七林地总径流量、总产沙量与坡度进行拟合,结果发现总径流量和总产沙量与坡度呈极显著指数关系($p < 0.01$)(图 7), $R^2 > 0.90$ 。不同管理措施三七林地总径流量和总产沙量随着坡度的增加而增大,并且坡度越大,流失增幅越大。

3 讨论

3.1 林下三七不同管理措施对产流产沙和土壤特性的影响

不同管理措施导致三七种植坡面产流产沙和土壤特性有所差异。本研究表明,自然林地和林下整地土壤特性均与其他管理措施三七林地存在显著差异;无棚三七林地和有棚三七林地平均几何直径和土壤抗冲系数存在显著差异($p < 0.05$),其他土壤特性无显著差异。自然林地枯落物储量显著高于其他管理措施三七林地。林下整地时进行林地除杂促使枯落物储量骤减,种植三七虽使草本覆盖度增加,但因三七叶片也具有药用价值,雨季过后在落叶期对三七的叶片进行收集,林下整地与种植三七后枯落物都由华山松林自然凋落补充,故林下整地 and 三七种植林地枯落物储量无显著差异。

土壤体积质量的大小主要反映土壤的松弛程度^[16]。本研究发现,土壤饱和导水率、总孔隙度在不同管理措施三七林地中的差异与土壤体积质量呈

相反的规律。与自然林地相比,林下整地和三七种植林地的土壤饱和导水率、总孔隙度显著降低,土壤体积质量增加,林下整地变化最大。主要是因为整地时对林地 20—30 cm 层土壤进行旋耕严重破坏林地表土结构,且林下整地后的土壤一直没有种植管理和外源有机物质的输入,土壤孔隙结构难以形成^[17],使土壤体积质量保持较高的水平。与林下整地相比,种植三七后植物根系生长与分泌大量有机物质,从而相对提高垄上土壤孔隙度、土壤饱和导水率和有机质质量分数,降低垄上土壤体积质量。 >0.25 mm 团聚体比例及土壤团聚体结构破坏率可反映土壤结构的稳定性,平均质量直径和平均几何直径可表征土壤结构的水稳性^[18]。本研究显示,与林下整地相比,林下种植三七可提高土壤中 >0.25 mm 团聚体比例、平均质量直径和平均几何直径,降低土壤团聚

体结构破坏率,对土壤特性有一定的改善。土壤结构组成直接影响 K 值。研究^[13]发现,坡面土壤成分中粉粒最易被侵蚀,与本研究结果相似。林下整地导致林地土壤粉粒质量分数明显增加,导致林下整地的 K 值最大。相较于林下整地,种植三七后林地土壤粉粒质量分数相对减少,加之三七种植后林地土壤的固碳能力增强,从而导致 K 值有所减小。土壤抗冲系数的表现与 K 值相反,自然林地土壤抗冲系最大。自然林地植被覆盖高且地表裸露面积小,能抵御降雨和水流的冲击^[19]。主成分分析显示,不同管理措施三七林地土壤饱和导水率、枯落物储量、土壤体积质量和 K 值对产流产沙的影响较强。若要降低林下三七种植对水土造成的侵蚀和破坏,则可在之后的种植过程中通过改善土壤特性来提高土壤抗蚀性,以减少林地水土流失。

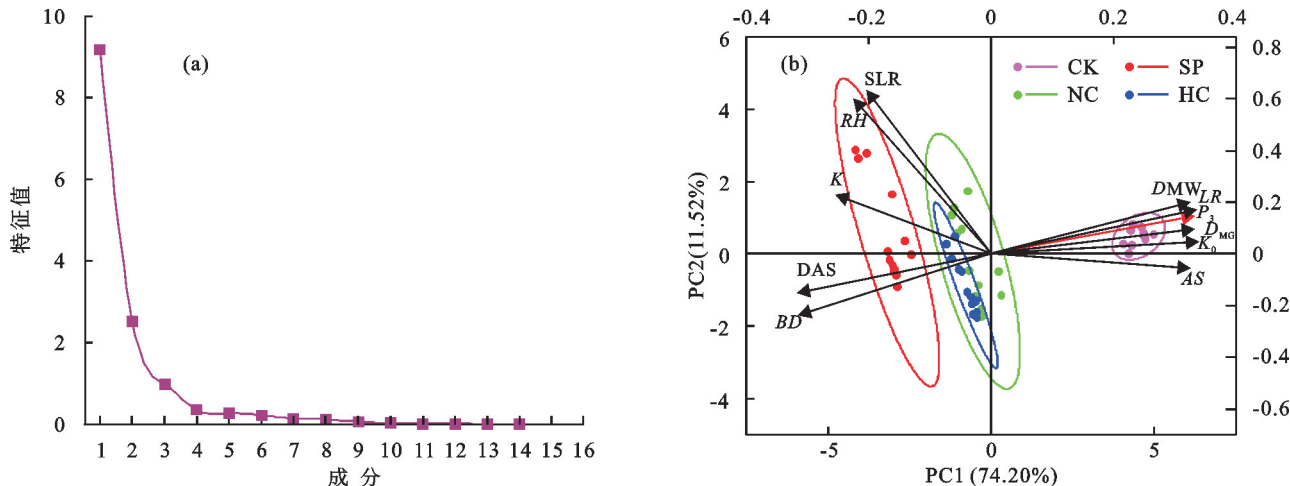


图 6 不同管理措施三七林地土壤特性与产流产沙的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of soil characteristics, runoff and sediment in *P. notoginseng* forest under different management

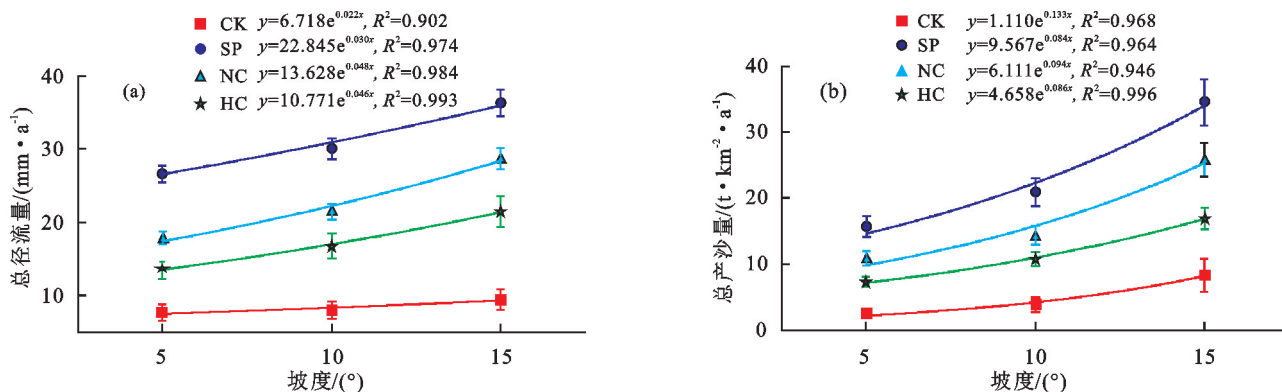


图 7 坡度与不同管理措施三七林地产流产沙的关系

Fig.7 Relationship between slope, runoff and sediment of *P. notoginseng* forest land under different management

本研究表明,相较于自然林地,林下整地的产流产沙量最高,其次是无棚三七林地,然后是有棚三七林地。林下整地、无棚三七林地和有棚三七林地的平均总径流量分别较自然林地增加 272.04%, 171.09% 和

106.81%, 平均总产沙量分别较自然林地增加 385.45%, 248.98% 和 138.93%。这一结论主要是由于林下整地时对灌木层和草本层进行清除,林下植被层的水文生态效应丧失。当降雨发生时,林地不能发挥灌木层

削弱雨滴动能及草本层分散径流和过滤径流中土壤颗粒^[20]的作用。有研究^[21]表明,枯落物可有效降低土壤分离的能力及提高土壤抗冲刷性能。整地时清除枯落物及旋耕,使坡面抗侵蚀能力骤降,从而导致林下整地水土流失最高。与林下整地相比,无棚三七林地平均产流产沙量有所减少。主要是三七种植后,无棚三七林地的草本层植被覆盖度整体高于林下整地,而较高的植被覆盖度,一是可以有效降低降雨动能,减弱雨滴对垄上表土的直接作用,有效减缓垄上击溅侵蚀^[21];二是可以降低径流的流速,削弱径流的输沙能力,从而减少坡面径流量和侵蚀泥沙量。三七种植林地在前 2 年枯落期做了留根处理,相对于林下整地,其根系密度有所提高,根系的缠绕和固结作用发挥较好的固土效率,对径流的阻碍作用增强,对降雨入渗的促进作用增强,导致无棚三七林地土壤抗地表径流侵蚀的能力较强。种植期间垄间频繁的除草、病虫害防治、采摘三七叶片等人为活动导致地表土壤板结,形成垄间结皮,该结皮在降雨时也起到抵御部分雨滴溅击能的作用^[22]。与无棚三七林地相比,有棚三七林地产沙量减少显著。一方面是因雨棚能避免降雨雨滴直接击打垄上表土层,阻断垄上击溅侵蚀;另一方面,是因为在华山松乔木层林冠截留后,雨棚充当灌木层,将部分降水拦截蒸散到大气中,再次削弱降雨能量,降低到达垄间地表的实际有效雨量和实际雨强^[23]。因此有棚三七林地产沙量明显减少。

研究表明,不同管理措施三七林地以林下整地 15° 坡面产沙量最大,为 34.53 t/(km²·a),属于微度侵蚀,远低于西南岩溶区土壤容许流失量[500 t/(km²·a)]。说明即使林下整地和种植三七对林地水土流失产生不利影响,但等高起垄耕作却有效缓解水土流失。等高起垄耕作使地表径流沿坡顺流变为沿垄横流,降低地表径流流速,延长地表径流的入渗时间,其坡面微地貌的更改缩短坡长,使流失的泥沙大部分在垄的边缘堆积,形成林下种植固土保水的良性循环^[24]。

3.2 降雨特征和坡度对不同管理措施林地产流产沙的影响

降雨量、降雨侵蚀力、降雨强度是引起坡面产流产沙最密切的 3 个参数^[25]。在本研究中,产流产沙量与降雨量和降雨侵蚀力之间呈极显著正相关($p < 0.01$),各管理小区径流量、产沙量与降雨量或降雨侵蚀力、降雨强度之间幂函数关系最为密切,均达到显著相关水平($p < 0.05$)。其中,林下整地小区产流产沙与降雨侵蚀力联系紧密,自然林地、无棚和有棚三七林地小区产流产

沙与降雨量联系更为紧密。主要因自然林地、无棚和有棚三七林地小区的植被覆盖度和垂直结构比林下整地高和复杂,起到很好的消减降雨动能的作用,因此,降雨量对 3 个管理措施小区产流产沙的解释比降雨侵蚀力强。各小区径流量与 I_{30} 之间关系最紧密;自然林地和三七种植林地产沙量与 I_{30} 之间关系最紧密;而林下整地的产沙量与 I_5 之间关系最紧密。说明各小区径流量均受长历时高强度降雨影响,而植被覆盖度高的林地,产沙量受长历时高强度降雨控制,植被覆盖低的林地,产沙量受短历时高强度降雨控制^[26]。华山松林整地后,枯落物储量仅有自然林地的 25.18%,所以产沙量与 I_5 的关系密切。

坡度是影响水土流失的重要因素,坡度通过影响入渗量,改变雨滴对地面的打击角度及雨滴分散土壤颗粒的能力,进而影响坡面土壤侵蚀。坡度增加时,土壤入渗量减少,坡面流速增加,坡面径流动能增大^[27],加剧土壤侵蚀。研究表明,各处理林地的径流量、土壤流失量均随坡度的增加而增加,且与坡度呈正指数关系, R^2 均达 0.90 以上。并且随着坡度增大,流失的增幅越大,说明坡度越大的林地径流和土壤流失量越大。因此,建议在缓坡林地上种植三七,以减少水土流失。

4 结论

(1) 2022 年寻甸县全年降雨总量为 1 031.70 mm,比多年平均降雨量多 12.90 mm,属平水年份。林外和林内累计侵蚀性降雨量分别为 845.40, 565.60 mm,林冠截留率为 9.97%~67.38%。

(2) 各管理措施三七林地产流产沙差异极显著($p < 0.01$)。与 CK 相比,SP、NC 和 HC 平均总径流量分别增加 272.23%, 171.19% 和 106.89%,平均总产沙量分别增加 385.15%, 248.82% 和 138.84%;最大土壤流失量[34.53 t/(km²·a)]远低于西南岩溶区土壤容许流失量;三七林地布设雨棚有较好的减沙效果。

(3) 自然林地、林下整地土壤特性分别与其他管理措施三七林地土壤特性存在显著差异;无棚三七林地和有棚三七林地平均几何直径和土壤抗冲系数存在显著差异($p < 0.05$),其他土壤特性无显著差异;主成分分析显示,不同管理措施三七林地土壤饱和导水率、枯落物储量、土壤体积质量和 K 值对产流产沙的影响较大,种植过程中可通过改善土壤特性来缓解水力侵蚀。

(4) 各管理措施三七林地产流产沙和降雨量或降雨侵蚀力与降雨强度之间呈显著幂函数关系($p < 0.05$)。

总径流量和产沙量与坡度呈极显著正指数关系($p < 0.01$), $R^2 > 0.90$ 。且随着坡度增加,各林地产沙产流增幅越大,建议在缓坡林地种植三七。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 2022 年中国水土保持公报[EB/OL]. (2023-08-25) [2024-05-10]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202308/t20230825_1680719.html.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2022 China Soil and Water Conservation Bulletin [EB/OL]. (2023-08-25) [2024-05-10]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202308/t20230825_1680719.html.
- [2] 王永平, 周子柯, 滕昊蔚, 等. 滇南小流域 3 种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 11-18.
WANG Y P, ZHOU Z K, TENG H W, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient losses in three land use patterns in the small watershed of southern Dianchi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(1): 11-18.
- [3] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015—2070) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [4] 李佳洲, 施本义, 杨宽, 等. 2 种植物源有机肥对林下有机三七生长及品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(9): 136-148.
LI J Z, SHI B Y, YANG K, et al. Effects of two kinds of plant-derived organic fertilizers on the growth and quality of organic *Panax notoginseng* under forest [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(9): 136-148.
- [5] YANG K, WANG H L, LUO L F, et al. Effects of different soil moisture on the growth, quality, and root rot disease of organic *Panax notoginseng* cultivated under pine forests [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: e117069.
- [6] FELIX F C, CÂNDIDO B M, DE MORAES J F L. Improving RUSLE predictions through UAV-based soil cover management factor (C) assessments: A novel approach for enhanced erosion analysis in sugarcane fields [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: e130229.
- [7] WOLKA K, BIAZIN B, MARTINSEN V, et al. Soil and water conservation management on hill slopes in Southwest Ethiopia. I. Effects of soil bunds on surface runoff, erosion and loss of nutrients [J]. Science of the Total Environment, 2021, 757: e142877.
- [8] 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.
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.
- [9] 钟祎珣, 张晓明, 高超, 等. 大别山南麓裸地小区径流泥沙过程对降雨特征的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 132-141.
ZHONG Y X, ZHANG X M, GAO C, et al. Response of runoff and sediment process to rainfall characteristics in bare land plots in southern foot of Dabie Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 132-141.
- [10] 杨坪坪, 李勇, 宋涛, 等. 典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J]. 生态环境学报, 2021, 30(1): 53-62.
YANG P P, LI Y, SONG T, et al. Characteristics of erosive rainfall patterns and benefit of soil and water conservation for biological measures on slope in karst region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(1): 53-62.
- [11] 杨宽, 张帅, 郭力维, 等. 澜沧县林下三七圆斑病的发生及避雨栽培的控制效果[J]. 中药材, 2020, 43(12): 2857-2863.
YANG K, ZHANG S, GUO L W, et al. Occurrence of understory planted *Panax notoginseng* round spot in Lancang County and its control effect of rain-sheltered cultivation [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2020, 43(12): 2857-2863.
- [12] 杨馥羽, 陈奇伯, 黎建强, 等. 计划烧除对云南松林土壤抗蚀和抗冲性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(1): 188-197.
YANG F Y, CHEN Q B, LI J Q, et al. Effect of prescribed burning on soil anti-erodibility and anti-scourability of *Pinus yunnanensis* forest [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(1): 188-197.
- [13] 徐贵迁, 赵洋毅, 王克勤, 等. 金沙江干热河谷冲沟系统优先流影响下的土壤可蚀性[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(4): 101-113.
XU G Q, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Soil erodibility under the influence of preferential flow in the gully system of the Jinsha River Dry Hot Valley [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(4): 101-113.
- [14] ALVES G J, MELLO C R, GUO L, et al. Natural disaster in the mountainous region of Rio de Janeiro state, Brazil: Assessment of the daily rainfall erosivity as an early warning index [J]. International Soil and Water

- Conservation Research, 2022, 10(4): 547-556.
- [15] 中国气象局. 降水量等级: GB/T 28592—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- China Meteorological Administration. Grade of precipitation: GB/T 28592—2012 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2012.
- [16] CERDÀ A, DALIAKOPOULOS I N, TEROL E, et al. Long-term monitoring of soil bulk density and erosion rates in two *Prunus persica* (L.) plantations under flood irrigation and glyphosate herbicide treatment in La Ribera district, Spain[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 282: e111965.
- [17] LIU J X, LIU G B, FLANAGAN D C, et al. Effects of soil-incorporated plant litter morphological characteristics on the soil detachment process in grassland on the Loess Plateau of China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 705: e134651.
- [18] DUGAN I, BOGUNOVIC I, PEREIRA P. Soil management and seasonality impact on soil properties and soil erosion in steep vineyards of north-western Croatia [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2023, 71(1): 91-99.
- [19] 张杰, 郑太辉, 肖胜生, 等. 不同植被恢复模式对红砂岩土壤化学性质及抗蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 115-122.
- ZHANG J, ZHENG T H, XIAO S S, et al. Effects of different vegetative restoration patterns on soil chemical properties and corrosion resistance of soils derived from red sandstone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 115-122.
- [20] LIU C L, ZHANG K D, WEI S E, et al. Evaluation of the effects of grass and shrub cover on overland flow resistance and its attributes under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: e130285.
- [21] 何伟鹏, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 不同植物对黄土边坡产流产沙与抗剪强度的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 18-26.
- HE W P, HU X S, LIU C Y, et al. Effects of different plants on runoff and sediment yield and shear strength of loess slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 18-26.
- [22] 郭雅丽, 赵允格, 高丽倩, 等. 黄土丘陵区草本植物覆盖下生物结皮对坡面径流流速的削减作用[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1871-1877.
- GUO Y L, ZHAO Y G, GAO L Q, et al. Reduction of flow velocity by biological soil crust of revegetated grassland in the hilly Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1871-1877.
- [23] 沈子雅, 程金花, 赵激, 等. 降雨条件下灌草配置方式对褐土坡面径流泥沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 17-23.
- SHEN Z Y, CHENG J H, ZHAO W, et al. Effects of different configuration patterns of shrub and grass on runoff and sediment characteristics from cinnamon soil under rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 17-23.
- [24] RONG L, DUAN X W, ZHANG G L, et al. Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 187: 72-84.
- [25] 朱方方, 秦建森, 朱美菲, 等. 模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(3): 10-18.
- ZHU F F, QIN J M, ZHU M F, et al. Effect of mulch structure on runoff and sediment yield under simulation rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 10-18.
- [26] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1078-1085.
- YANG C X, YAO W Y, XIAO P Q, et al. Effects of vegetation cover structure on runoff and sediment yield and its regulation mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9): 1078-1085.
- [27] 王伟伟, 吕茂奎, 胥超, 等. 亚热带常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失动态特征对降雨的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(18): 7474-7484.
- WANG W W, LÜ M K, XU C, et al. Responses of organic carbon loss dynamics to rainfall in the evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7474-7484.