

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.04.026; CSTR:32311.14.rswc.2025.04.026.

晏慧颖, 黎建强, 杨舒媛, 等. 林下黄精种植对水土及氮、磷流失的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(4): 76-83.

Yan Huiying, Li Jianqiang, Yang Shuyuan, et al. Impacts of under-forest *Polygonatum kingianum* planting on water, soil, nitrogen, and phosphorus losses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(4): 76-83.

林下黄精种植对水土及氮、磷流失的影响

晏慧颖, 黎建强, 杨舒媛, 赵思倩, 刘方严, 刘艳娇, 汤汶奇

(西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650224)

摘要: [目的] 研究揭示林下黄精种植相关影响, 明确降雨和坡度与产流产沙量、氮、磷流失量的关系, 为林下种植中药材模式的水土及氮、磷流失评估及控制提供理论依据。[方法] 以云南省寻甸县黄精 (*Polygonatum kingianum* Collett & Hemsl.) 种植林地研究对象, 采用田间径流小区原位观测, 分析了自然降雨条件下不同坡度 (5°, 10°, 15°) 黄精种植林地水土及氮、磷的流失特征。[结果] 黄精种植林地平均年产流产沙量较自然林地分别增加 164.44% 和 251.16%, 且随着坡度的增加而增加。黄精种植林地全氮 (TN)、全磷 (TP)、铵态氮 (NH₄⁺-N)、硝态氮 (NO₃⁻-N) 平均年流失量是自然林地的 2.85, 1.75, 4.71, 2.31 倍, TN、TP 流失的主要途径是侵蚀泥沙, NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 流失的主要途径是地表径流。降雨量与径流量、产沙量和氮磷流失量之间呈极显著正相关。[结论] 黄精种植显著增加了林地水土和氮、磷流失量, 降雨量是影响黄精种植林地径流和氮、磷流失量的主要因素, 但黄精种植林地的产沙量远低于西南土石山区的容许土壤流失量。

关键词: 林下种植; 黄精; 水土流失; 氮磷流失

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)04-0076-08

Impacts of under-forest *Polygonatum kingianum* planting on water, soil, nitrogen, and phosphorus losses

Yan Huiying, Li Jianqiang, Yang Shuyuan, Zhao Siqian, Liu Fangyan, Liu Yanjiao, Tang Wenqi

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

Abstract: [Objective] The study aims to reveal the impacts of planting *Polygonatum kingianum* Collett & Hemsl (*P. kingianum*) under forest, to clarify the relationships between rainfall, slope and runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus loss, and to provide theoretical basis for the assessment and control of water, soil, nitrogen, and phosphorus losses in under-forest traditional Chinese medicinal herb planting models. [Methods] The study was conducted in the *P. kingianum* cultivation forest in Xundian County, Yunnan Province. The characteristics of water, soil, nitrogen, and phosphorus losses at different slopes (5°, 10°, 15°) under natural rainfall conditions were analyzed using in-situ observation of field runoff. [Results] The average runoff and sediment yield of *P. kingianum* cultivation forest were 164.44% and 251.16% higher than those in the natural forests, respectively, and increased with slope. The annual average losses of TN, TP, NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N in *P. kingianum* cultivation forest were 2.85, 1.75, 4.71, and 2.31 times higher than those in the natural forests, respectively. The main pathways for TN and TP losses were erosion and sedimentation, while the main pathway for NH₄⁺-N and NO₃⁻-N losses was surface runoff. There was a highly significant positive correlation between rainfall and runoff, sediment yield, and nitrogen and phosphorus loss. [Conclusion] The planting of *P. kingianum*

收稿日期: 2024-07-19

修回日期: 2024-09-28

接受日期: 2024-10-14

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 (32060345)

第一作者: 晏慧颖 (2000—), 女 (苗族), 贵州铜仁人, 硕士在读, 研究方向为水土保持。E-mail: 18744859552@163.com

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

<http://stbcyj.paperonce.org>

significantly increases the amount of water, soil, nitrogen, and phosphorus losses in the forest. Rainfall is the main factor affecting the runoff and nitrogen and phosphorus loss in *P. kingianum* cultivation forest. However, the sediment yield in *P. kingianum* cultivation forest is much lower than the tolerable soil loss in southwestern rocky mountainous areas.

Keywords: under-forest planting; *Polygonatum kingianum*; water and soil loss; nitrogen and phosphorus loss

水土流失是当今世界的重大环境问题之一,在降雨过程中,肥沃的表层土壤随径流流失,造成土地退化、生产力水平下降,严重阻碍了农业的可持续发展^[1]。此外,水和沙是物质运移的主要载体,而地表径流及泥沙携带的氮、磷等营养物质是湖泊、河流面源污染物的主要来源^[2]。这一现象不仅影响农业生产,还对生态系统的健康和稳定构成威胁。在水土流失过程中,大量侵蚀性泥沙携带和吸附的土壤养分进入水体,导致受纳水体富营养化程度加剧,造成水污染^[3]。农业种植过程中,不合理的土地利用方式如过度耕作、植被破坏和不当施肥,导致土壤抗侵蚀能力下降,水土流失和面源污染日趋严重^[4]。

森林是陆地生态系统的主体和人类生存发展的基础,在涵养水源、保持水土、养分固持等方面起重要的作用^[5]。林下中药材种植是利用林下自然条件和生境,培育中药材,对于提高中药材的品质和药效具有重要意义,也促进了生态与经济效益的共赢^[6]。这种种植方式可以充分利用森林资源,减少对土地的进一步开发,同时通过中药材的种植,可以增加农民收入,促进当地经济发展。然而,林下种植中药材在带来经济效益的同时,也对森林生态系统的功能,特别是对水土保持功能造成不利影响。在林下种植中药材过程中,林地清理、整地、施肥和灌溉等管理措施,改变了林地的地表覆盖、土壤结构特性和水文生态功能,可能增加水土及养分流失风险。因此,对林下种植的水土及氮、磷流失的影响进行研究对于林下种植的水土流失影响评估具有重要意义。

国内外学者围绕水土流失开展了大量的研究工作,但研究内容主要集中在坡耕地,即水土流失影响因素如降雨^[7-8]、坡度^[9-10]、水土保持措施^[11-12]和植物覆盖等^[13-14]对坡耕地水土和养分流失的影响等方面。然而,林下种植与传统的农业种植方式不同,其土地利用方式、地表覆盖、管理措施和耕作强度均存在显著差异,林下种植模式对水土流失影响缺乏系统的报道。云南省是我国四大林区之一,森林资源丰富,具有发展林下经济的天然优势^[15]。黄精(*Polygonatum kingianum* Collett et Hemsl.)为百合科黄精属植物,具有较高的医用和食用价值,林下黄精

模式是黄精生产的主要方式之一,具有广阔的发展前景^[16]。因此,本研究以林下黄精种植林地为研究对象,采用野外径流小区原位试验,通过对天然降雨条件下自然林地和黄精种植林地水土和氮、磷养分流失的定量观测和对比分析,揭示林下黄精种植对水土及氮、磷流失的影响,明确降雨和坡度与产流产沙量、氮、磷流失之间的关系,以期为林下种植模式的水土流失及养分流失评估和防治提供理论依据和实践指导。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省昆明市寻甸县云南农业大学林下三七种植基地(103°12'45"E,25°28'16"N)。该地区土壤类型以黄褐色土壤为主,气候属亚热带季风,夏季高温多雨,冬季温和少雨,海拔高度2 100~2 270 m,年均气温为14.90℃,年均降雨量为1 020.90 mm,雨季集中在6—10月。区内林分优势树种为华山松(*Pinus armandii* Franch.),平均树龄为25 a,平均树高9.50 m,林下灌草零星分布有火棘[*Pyracantha fortuneana* (maxim.) H L Li]、褐枝短柱茶(*Camellia phaeoclada* Chang)、胡桃(*Juglans regia* L.)、短叶水蜈蚣(*Kyllinga brevifolia* Rottb.)、阴地蕨[*Sceptridium ternatum* (Thunb.) Lyon]、土牛膝(*Achyranthes aspera* L.)等。

林下黄精种植前需对林地进行清理并整地,具体进行除杂、翻耕、起垄、修建排水防洪沟渠等措施;根据地形条件进行等高起垄,垄面宽度为100~150 cm,垄高为20~30 cm。将在苗圃培育的1 a生黄精苗按(10~15)cm×(10~15)cm的株行距移植到整理好的垄面,移栽完覆土后用松针盖严垄面,覆盖厚度3~5 cm(图1)。黄精种植前在林地施加农家肥,种植期间不施用化肥和农药。

1.2 试验设计

本研究采用野外径流小区原位观测试验,在黄精种植林地(P)和自然林地(C)中选择立地条件、土壤质地基本一致,设置不同坡度为5°,10°和15°的径流小区,径流小区随机排列,不同坡度黄精种植林地和自然林地径流小区分别用P_{5°}、P_{10°}、P_{15°}和C_{5°}、C_{10°}、

C_{15} 表示。试验样地的基本情况见表1。黄精种植林地径流小区规格为20 m×15 m,自然林地径流小区规格为20 m×5 m。于2023年雨季(6—10月)对次降雨条件下不同坡度黄精种植林地和自然林地的水土及氮、磷流失量进行观测。

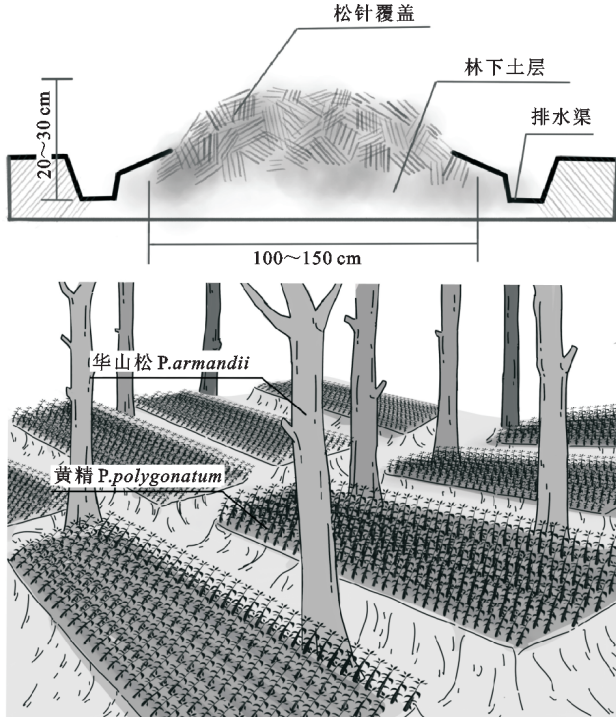


图1 林下黄精种植模式及整地示意图

Fig. 1 Diagram of under-forest *Polygonatum kingianum* planting model and land preparation

表1 黄精种植林和自然林地的基本概况

Table 1 Overview of *Polygonatum kingianum* cultivation forest and natural forest

林地类型	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	郁闭度/%	TN/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)
黄精种植林地	1146	18	78.3	1.82	2.46	21.20	0.78
自然林地	1146	18	78.3	1.72	0.34	12.65	0.44

2 结果与分析

2.1 林下黄精种植产流产沙的特征

黄精种植林地和自然林地不同坡度条件下次产流产沙及降雨特征见图2。2023年研究区共发生侵蚀性降雨10场,年降雨量为844.80 mm,累计侵蚀性降雨量为629.40 mm,占年降雨量的74.50%,其中8月降雨量最高为314.60 mm,占年降雨量的37.24%。不同坡度下自然林地和黄精种植林地产流产沙差异显著,并与降雨量的变化趋势一致。2023年8月9日单日降雨量最大为129.40 mm,同日各林地产流产沙量亦最大,于8月26日单日降雨量最小为21.4 mm,同日各林地产流产沙量最小。

黄精种植林地和自然林地不同坡度条件下年产流产沙特征见图3。由图3可知,黄精种植林地和自

1.3 测定指标与方法

1.3.1 样品采集 每次侵蚀性降雨结束后,首先测量集径流池内水的深度,精确到0.1 cm,计算得出各小区径流量^[17];然后将径流池内泥沙径流充分搅拌均匀,使用0.625 L的聚氯乙烯塑料瓶取3瓶水样,带回实验室。将样品静置24 h,取上清液500 ml用于氮、磷指标分析测定。将样品中泥沙冲洗至铝盒,放入烘箱,温度设置75℃,烘干至恒重后称重,计算泥沙含量及土壤流失量,并将烘干后的泥沙密封保存,用于后续指标分析测定。

1.3.2 测定项目 (1)降雨量观测。采用美国HOBO Onset RG3-M自记式雨量计对径流小区附近的林外降雨量和降雨历时进行观测。

(2)理化指标测定。径流水样采用连续流动分析仪(德国,SEAL Analytical AA3)测定总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、铵态氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)含量,其中NO₃⁻-N, NH₄⁺-N测定前样品需用0.45 μm微孔滤膜过滤^[18];侵蚀泥沙样品中TN, TP采用浓硫酸过氧化氢消解法制备待测液,使用连续流动分析仪测定;泥沙中NO₃⁻-N, NH₄⁺-N采用氯化钾浸提,采用连续流动分析仪测定^[19]。

1.4 数据统计分析

运用Microsoft Excel 2019软件进行初步数据整理,采用SPSS 27.0软件进行差异显著性和相关性分析,使用Origin 2023进行绘图。

然林地在15°坡面年产流产沙量最大,分别为11.61 mm/a, 19.66 t/(km²·a), 10°坡面次之,年产流产沙量分别为8.74 mm/a, 12.95 t/(km²·a), 5°坡面最小,分别为5.41 mm/a, 8.23 t/(km²·a)。同一坡度下,黄精种植林地年产流产沙量显著高于自然林地,并且年产量和产沙量随坡面坡度的增大而增大。不同坡度黄精种植林地平均年产量和产沙量分别为8.59 mm/a和13.61 t/(km²·a),较自然林地分别增加了164.44%和251.16%。

2.2 黄精种植林地氮、磷流失特征

不同坡度黄精种植林地和自然林地次降雨下径流和泥沙的氮、磷含量见图4。由图4可知,黄精种植林地和自然林地地表径流中TN浓度随坡度的增加而增加,浓度范围分别为0.55~6.27, 0.21~5.86 mg/L;林地径流中TP浓度无显著规律,黄精种植林地和自

然林地浓度范围分别为 0.03~0.68, 0.02~1.11 mg/L; 黄精种植林地径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均高于自然林地, 且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随坡度的增加而降低, 自然林地径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随坡度的增加而增加, 黄精种植林地和自然林地浓度范围分别为 0.40~1.66, 0.21~2.37 mg/L; 黄精种植林地径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著低于自然林地, 其浓度范围分别为 0.11~3.39, 0.34~3.86 mg/L; 黄精种植林地泥沙中 TN 含量随坡度的增大而增加, 含量为 1.20~16.87 g/kg, 自然林地泥沙中 TN 含量随坡度

的增大而降低, 含量为 2.40~16.08 g/kg; 黄精种植林地泥沙中 TP 含量显著低于自然林地, 且含量随坡度的增大而增加, 黄精种植林地和自然林地含量分别为 0.99~3.80, 1.10~4.75 g/kg; 黄精种植林地泥沙中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著高于自然林地, 且均随坡度的增大而增加, 黄精种植林地和自然林地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量分别为 0.11~0.27, 0.03~0.18 g/kg, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别为 0.08~0.82, 0.05~0.11 g/kg。

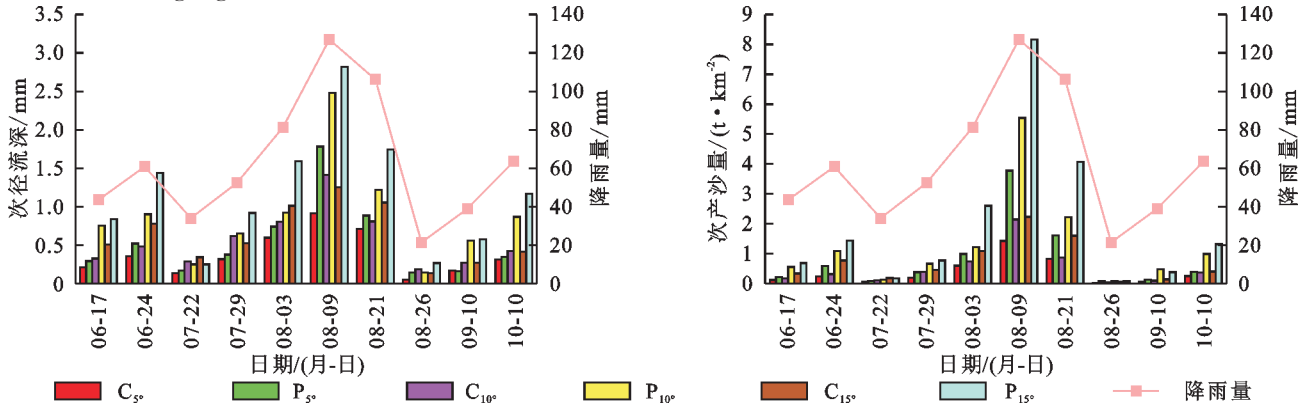
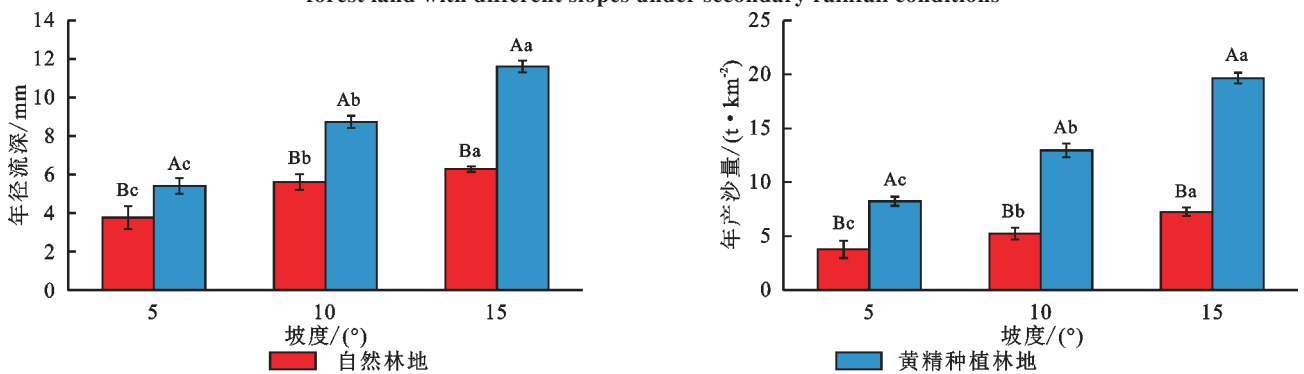


图 2 次降雨条件下不同坡度黄精种植林地和自然林地的产流、产沙特征

Fig. 2 Characteristics of runoff and sediment yield of *Polygonatum kingianum* cultivation forest and natural forest land with different slopes under secondary rainfall conditions



注: 不同小写字母表示不同坡度间差异性显著 ($p < 0.05$), 不同大写字母表示不同处理间差异性显著 ($p < 0.05$)。下图同。

图 3 不同坡度黄精种植林地和自然林地总径流量和总土壤流失量

Fig. 3 Total runoff and total soil loss of *Polygonatum kingianum* cultivation forest and natural forest land with different slopes

不同坡度黄精种植林地和自然林地次降雨下径流和泥沙的年氮、磷流失量见表 2。由表 2 可知, 同一坡度下, 与自然林地相比, 黄精种植林地的 TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失量显著增加 ($p < 0.05$)。黄精种植林地 TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均年流失量分别为 113.78, 34.53, 8.41, 13.15 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 是自然林地的 2.85, 1.75, 4.71, 2.31 倍。不同坡度下, 2 种林地间氮、磷流失量随坡度的增大而增大。黄精种植林地 TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 年流失量在 15° 坡面最大, 分别为 162.23, 52.46, 11.88, 20.25 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 其次为 10° 坡面, 分别为 115.91, 29.95, 8.23, 11.89 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 最小为 5° 坡面, 分别为 63.21, 21.17, 5.11, 7.31 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 显著高于对应的自然林地。黄精

种植林地和自然林地 TN, TP 流失的主要途径是侵蚀泥沙, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失的主要途径是地表径流。不同坡度黄精种植林地和自然林地泥沙中 TN 平均年流失量分别为 94.06, 36.30 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 分别占 TN 流失总量的 82.66%, 91.01%。不同坡度黄精种植林地和自然林地径流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均年流失量分别为 6.44, 1.16 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 分别占 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失总量的 76.57%, 64.86%; 不同坡度黄精种植林地和自然林地径流中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均年流失量分别为 9.30, 3.10 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 分别占 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失总量的 70.75%, 54.39%。不同坡度黄精种植林地和自然林地泥沙中 TP 平均年流失量分别为 2.18, 0.50 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 分别占 TP 流失总量的 93.86%, 97.18%。

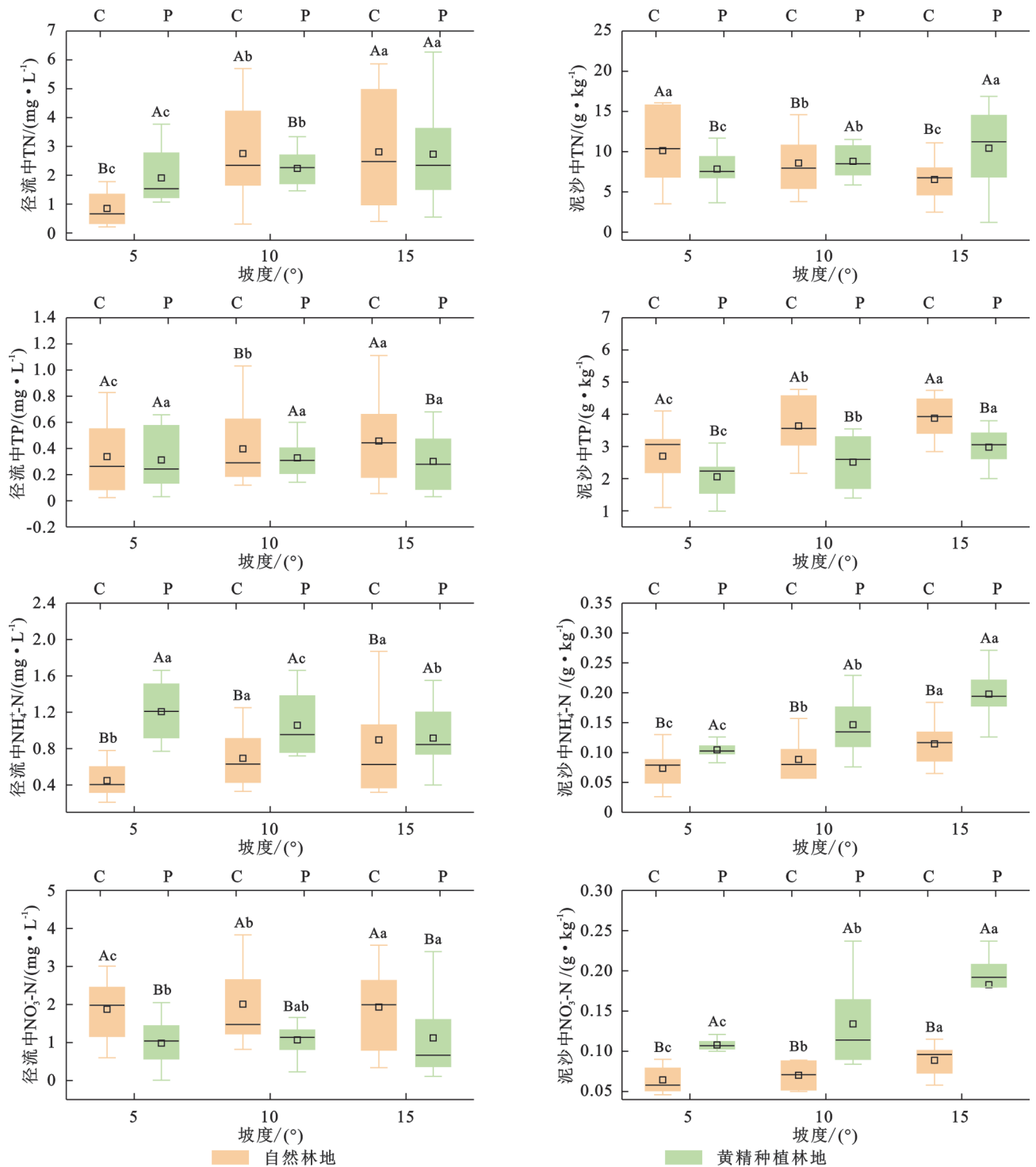


图 4 不同坡度黄精种植林地和自然林地径流、泥沙的氮、磷含量

Fig. 4 Nitrogen and phosphorus content in runoff and sediment of *Polygonatum kingianum* cultivation forest and natural forest with different slopes

2.3 黄精种植林地坡度和降雨与水土、氮磷流失量的关系

为进一步分析黄精种植林地水土流失及养分流失的影响因素,对研究区水土流失及养分流失量和降雨量、坡度的相关性进行了分析(表3)。由表3可知,径流量与降雨量之间存在极显著的正相关关系($p < 0.01$)。径流量与产沙量、氮、磷之间存在极显著的正相关关系($p < 0.01$),径流量的增加会促进土壤

和氮素、磷素的流失。TN, NH₄⁺-N和NO₃⁻-N与径流量的正相关系数分别为0.91, 0.81, 0.79,降雨和径流对氮素流失有显著影响。坡度与径流量之间存在显著的正相关关系($p < 0.05$),随着坡度的增加,水土流失的速率也会增加。坡度与氮、磷之间存在显著的正相关关系($p < 0.05$),坡度的增加可能会加剧氮素和磷素的流失,坡度也是影响水土及养分流失的重要因素。

表2 不同坡度黄精种植林地和自然林地径流、泥沙中的氮、磷的流失量

Table 2 Nitrogen and phosphorus loss in runoff and sediment of *Polygonatum kingianum* cultivation forest and natural forest with different slopes

指标	流失途径	C ₅ ^o	P ₅ ^o	C ₁₀ ^o	P ₁₀ ^o	C ₁₅ ^o	P ₁₅ ^o
TN	径流	3.18±0.02Bc	14.33±0.26Ac	3.70±0.03Bb	16.67±0.34Ab	3.86±0.04Ba	28.18±0.43Aa
	泥沙	23.94±1.99Bb	48.88±0.66Ac	31.12±0.59Bb	99.24±2.31Ab	53.85±6.11Ba	134.05±3.2Aa
	总和	27.13±Bc	63.21±Ac	34.82±Bb	115.91±Ab	57.72±Ba	162.23±Aa
TP	径流	0.41±0.05Bc	1.33±0.1Ac	0.55±0.03Bb	2.35±0.14Ab	0.72±0.03Ba	2.69±0.21Aa
	泥沙	12.92±0.17Bc	19.84±0.11Ac	16.69±0.51Bb	27.61±1.57Ab	27.95±1.51Ba	49.77±1.47Aa
	总和	13.33±Bc	21.17±Ac	17.24±Bb	29.95±Ab	28.66±Ba	52.46±Aa
NH ₄ ⁺ -N	径流	0.86±0.06Bc	4.34±0.17Ac	1.04±0.02Bb	6.42±0.13Ab	1.57±0.05Ba	8.55±0.46Aa
	泥沙	0.38±0.01Bc	0.78±0.01Ac	0.58±0.01Bb	1.81±0.05Ab	0.93±0.04Ba	3.33±0.18Aa
	总和	1.24±Bc	5.11±Ac	1.62±Bb	8.23±Ab	2.49±Ba	11.88±Aa
NO ₃ ⁻ -N	径流	2.61±0.09Bc	5.06±0.23Ac	2.98±0.05Bb	8.26±0.31Ab	3.71±0.13Ba	14.59±1.78Aa
	泥沙	1.72±0.04Bc	2.25±0.03Ac	2.52±0.03Bb	3.63±0.07Ab	3.56±0.04Ba	5.66±0.12Aa
	总和	4.33±Bc	7.31±Ac	5.50±Bb	11.89±Ab	7.27±Ba	20.25±Aa

注:不同小写字母表示不同坡度间差异显著($p < 0.05$),不同大写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

表3 黄精种植林地降雨与水土、氮磷流失量的相关性

Table 3 Correlation between rainfall and water, soil, nitrogen, and phosphorus loss in *Polygonatum kingianum* cultivation forest

指标	径流量	产沙量	TN流失量	TP流失量	NH ₄ ⁺ -N流失量	NO ₃ ⁻ -N流失量
降雨量	0.866**	0.933**	0.841**	0.825**	0.757**	0.532**
径流量	1	0.974**	0.947**	0.978**	0.842**	0.690**
产沙量	0.974**	1	0.937**	0.949**	0.840**	0.621**
坡度	0.406*	0.283	0.358	0.424*	0.429*	0.439*

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

3 讨论

3.1 林下黄精种植对产流产沙和氮、磷流失的影响

本研究结果表明,黄精种植林地平均总产流量和总产沙量分别为8.59 mm/a和13.61 t/(km²·a),较自然林地分别增加了164.44%和251.16%。林下种植黄精导致林地水土流失量较自然林地显著增加,其主要原因是一方面林下黄精种植过程中会对林地进行清理,如清理林下植被和枯落物等,使林下植被和枯落物的水文生态功能丧失,地表的溅蚀增强,地表径流量增加,对土壤的冲刷能力增强,导致水土流失量增加;另一方面整地过程中土壤结构遭到破坏,土壤抗蚀能力减弱,增加了土壤侵蚀的强度。此外,由于管理活动,人为踩踏土壤使空间土壤变得紧实,土壤入渗能力减弱,地表径流量增加。本研究表明在黄精种植林15°坡面产沙量最大,为19.66 t/(km²·a),但仍远低于西南土石山区的容许土壤流失量[500 t/(km²·a)]^[20]。原因是在黄精种植林地采用横坡整作和松针覆盖,可在一定程度上减轻土壤侵蚀。林下黄精种植显著增加了林地氮、磷流失量,黄精种植林地平均TN,TP,NH₄⁺-N,NO₃⁻-N流失量分

别为113.78,34.53,8.41,13.15 kg/(km²·a),是自然林地的2.85,1.75,4.71,2.31倍,这与黄精种植林地水土流失量的增加有关。氮、磷流失的主要途径是地表径流和侵蚀泥沙,氮、磷流失量的大小取决于地表径流量、泥沙流失量和养分浓度,黄精种植林地水土流失量的增加是导致养分流失量增加的主要原因。此外,黄精种植过程中,增施的有机肥导致土壤中的养分元素含量增加也导致养分流失增大^[21]。本研究中,黄精种植林地和自然林地TN,TP流失的主要途径是侵蚀泥沙,地表径流是NH₄⁺-N,NO₃⁻-N的主要流失途径。侵蚀泥沙是由地表径流冲刷表层土壤而产生,是一种富含土壤养分的微小土壤颗粒,对土壤养分有强吸附作用,其含有大量氮元素,导致养分在侵蚀泥沙中富集^[22],而NH₄⁺-N,NO₃⁻-N属溶解态无机氮,易溶解于地表径流。

3.2 降雨和坡度对产流产沙和氮、磷流失的影响

水土流失是多种因素影响的结果,如降雨、地形等^[23-24]。径流的发生与自然降雨密不可分,降雨是水力侵蚀过程中的驱动因子^[25]。本研究结果表明,降雨是影响水土和养分流失的关键因素,产流量、产沙量与降雨量存在着极显著的正相关关系。水土和养分流失

主要受降雨量的影响,降雨量增大,地表径流增大,在高强度的降雨下,雨滴击溅冲刷破坏了土壤团聚体结构,并迅速汇集成径流带走坡面表层土壤,土壤侵蚀量增加,导致水土及氮、磷流失量增大。坡度是影响平均入渗率、初始产流时间、径流总量和泥沙总量的主要因素,对水土流失的影响同样显著^[26]。本研究中,黄精种植林地和自然林地径流量、产沙量和氮、磷流失量均随坡度的增加而增大。坡度越大,降雨入渗越少,雨滴在坡面迅速汇集产生径流,初始产流时间提前,同时径流在重力的作用下运动加快,径流动能增强,侵蚀能力增强,导致坡面水土流失和养分流失增多^[27]。因此,在缓坡上进行黄精种植,可在一定程度上减小林下黄精种植对水土及养分流失的影响。水土流失是一个复杂的过程,受到多种环境因素的共同影响,除了降雨和坡度,土壤类型、植被覆盖、土地利用方式等也会对水土流失和养分流失产生影响。

4 结论

(1) 林下黄精种植导致产流量和产沙量增大,尤其在 15°坡面上最为显著。不同坡度的黄精种植林地产流产沙量存在显著差异,随着坡度的增加,产流产沙量呈增加趋势。黄精种植林地土壤侵蚀强度属于中度侵蚀,远低于西南土石山区容许土壤流失量。

(2) 同一坡度下,黄精种植林地 TN, NH_4^+-N , NO_3^--N 平均流失量显著增加,且流失量随坡度的增大而增大。TN, TP 流失主要的流失途径是侵蚀泥沙; NH_4^+-N , NO_3^--N 的主要流失途径是地表径流。

(3) 降雨量与径流量、产流量和产沙量呈显著或极显著正相关关系($p < 0.01$),径流量与氮、磷之间存在极显著的正相关关系($p < 0.01$),说明降雨量是影响黄精种植林地水土和氮、磷流失量的主要因素。坡度与径流量、产流量和氮、磷之间存在显著的正相关关系($p < 0.05$),表明坡度的增加可能会加剧水土和养分的流失。黄精种植林地的坡度和降雨条件是影响水土流失和氮、磷流失的关键因素。

参考文献 (References):

- [1] 王一峰,屈丽琴,李建明,等.基于近 20 年《中国水土保持公报》的水土流失治理分析[J].长江科学院院报,2023,40(7):59-65.
Wang Y F, Qu L Q, Li J M, et al. Analysis of soil erosion control based on China soil and water conservation bulletin in the past two decades[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023,40(7):59-65.
- [2] 李涛,鄢紫薇,王砚,等.丹江口库区不同种植模式下氮磷流失和经济效益分析[J].水土保持研究,2021,28(5):35-40.
Li T, Yan Z W, Wang Y, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus losses and environmental benefits under different planting patterns in Danjiangkou Reservoir area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):35-40.
- [3] Huang J, Xu C C, Ridoutt B G, et al. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017,159:171-179.
- [4] 晁增祖,梁耿,刘世生,等.典型泥石流小流域降雨和土地利用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持研究,2023,30(3):19-26.
Chao Z Z, Liang G, Liu S S, et al. Effects of rainfall and land use on slope erosion in typical debris flow small watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(3):19-26.
- [5] 左松源,陈国富,左宗贵,等.南京市森林生态系统服务功能与价值评估[J].林业资源管理,2021(6):76-82.
Zuo S Y, Chen G F, Zuo Z G, et al. Assessment of forest ecosystem service functions and values in Nanjing City [J]. Forest Resources Management, 2021(6):76-82.
- [6] 熊康宁,肖杰,朱大运.混农林生态系统服务研究进展[J].生态学报,2022,42(3):851-861.
Xiong K N, Xiao J, Zhu D Y. Research progress of agro-forestry ecosystem services and its implications for industrial revitalization in karst regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(3):851-861.
- [7] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J].生态学报,2018,38(2):624-634.
Peng X D, Dai Q H, Li C L. Output mechanism of soil nutrients from karst slope farmland under simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(2):624-634.
- [8] 彭梦玲,吴磊,乔闪闪.不同雨强下黄土裸坡水-沙-氮磷流失耦合模拟[J].中国环境科学,2018,38(3):1109-1116.
Peng M L, Wu L, Qiao S S. Coupling simulation of runoff-sediment-nutrient loss on loess bare sloping land under different rainfall intensities[J]. China Environmental Science, 2018,38(3):1109-1116.
- [9] 甘贤民,严友进,戴全厚,等.降雨强度和坡度对喀斯特坡耕地产流和氮磷流失的影响[J].环境科学学报,2024,44(4):116-123.
Gan X M, Yan Y J, Dai Q H, et al. Impact of rainfall intensity and slope gradient on runoff and nitrogen and phosphorus loss fluxes of sloping farmland in a karst area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(4):116-123.
- [10] 陆淑宁,李荣融,姚冲,等.横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J].土壤学报,2024,61(5):1271-1283.
Lu S N, Li R R, Yao C, et al. Study on the effects of counter tillage on runoff and sediment yield and process

- of nitrogen and phosphorus nutrient loss on sloping farmland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024,61(5):1271-1283.
- [11] Zhang X, Chen X M, Zhang W S, et al. Impact of land use changes on the surface runoff and nutrient load in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Sustainability*, 2022,14(4):2023.
- [12] 龚尧,杜文,王宇寰,等.横坡耕作与优化施肥对缓坡地氮磷流失特征和土壤肥力的影响[J].*水土保持通报*, 2023,43(5):53-61,68.
Gong Y, Du W, Wang Y H, et al. Effects of cross-slope tillage and increasing organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus loss characteristics and soil fertility on gentle slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(5):53-61,68.
- [13] 李刚浩,夏颖,黄敏,等.三峡库区坡耕地免耕秸秆覆盖下氮磷流失特征[J].*水土保持研究*,2023,30(2):93-99.
Li G H, Xia Y, Huang M, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses on sloping farmland under no-tillage and straw mulch in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):93-99.
- [14] Zhang Q W, Liu D H, Cheng S H, et al. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176:1-8.
- [15] 向艳平,肖丰.云南省林下中药材产业发展策略[J].*林业调查规划*,2022,47(2):166-171.
Xiang Y P, Xiao F. Development suggestions of under-forest traditional Chinese herbal medicine industry in Yunnan Province [J]. *Forest Inventory and Planning*, 2022,47(2):166-171.
- [16] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:三部[M].北京:中国医药科技出版社,2020.
Chinese Pharmacopoeia. People's Republic of China (PRC) Pharmacopoeia: part III [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.
- [17] 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.
- [18] 许在恩,叶子豪,傅伟,等.间伐对千岛湖流域生态公益林氮磷养分流失的影响[J].*中国水土保持*,2024(2):44-47.
Xu Z E, Ye Z H, Fu W, et al. Effects of thinning on nitrogen and phosphorus nutrient loss in ecological forest in Qiandao Lake Basin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(2):44-47.
- [19] 刘攀.尿素配施脲酶/硝化抑制剂对三江源区退化高寒草甸氮转化的影响及作用机理研究[D].西宁:青海师范大学,2021.
Liu P. Influences of urea combined with urease/nitrification inhibitor on nitrogen transformation and its mechanism research of degraded alpine meadow in the source region of Three Rivers [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021.
- [20] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [21] 张海香,李天阳,何丙辉,等.不同施肥与耕作方式下土壤-径流氮磷变化特征[J].*水土保持学报*,2023,37(3):281-287.
Zhang H X, Li T Y, He B H, et al. Change characteristics of nitrogen and phosphorus in soil-runoff under different conditions of fertilization and tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(3):281-287.
- [22] Wang F C, Li Z B, Cheng Y T, et al. Effect of thaw depth on nitrogen and phosphorus loss in runoff of loess slope[J]. *Sustainability*, 2022;14(3):1560.
- [23] Xie H T, Wang G G, Yu M K. Ecosystem multifunctionality is highly related to the shelterbelt structure and plant species diversity in mixed shelterbelts of eastern China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 16:470.
- [24] 孙雪娇,李吉玫,张毓涛,等.天山北坡山地森林林地产生流沙特征及其影响因素分析[J].*生态环境学报*, 2021,30(9):1821-1830.
Sun X J, Li J M, Zhang Y T, et al. Characteristics and influence of runoff and sediment yield in mountain forest on the north slope of Tianshan Mountains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(9):1821-1830.
- [25] 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.
- [26] Wang S B, Song Y L, Wang K Q, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018,34(13):160-169.
- [27] 郭星星,吕春娟,陈丹,等.降雨强度和坡度对裸露铁尾矿砂坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(2):23-29.
Guo X X, Lv C J, Chen D, et al. Effects of rainfall intensities and slope gradients on runoff and sediment yield on bare iron tailings sand slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(2):23-29.