

DOI: 10.16843/j.sswc.2024031

引用格式: 阮长明, 马绍东, 王必海, 等. 金沙江干热河谷不同区段植被恢复对水土保持特征的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(1): 90–101. RUAN Changming, MA Shaodong, WANG Bihai, et al. Effects of vegetation restoration on soil and water conservation characteristics in different zones of the Dry-Hot Valley of the Jinsha River [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(1): 90–101.

金沙江干热河谷不同区段植被恢复 对水土保持特征的影响

阮长明¹, 马绍东², 王必海¹, 王 猛^{3†}, 欧朝蓉³, 孙永玉^{4,5,6†}, 张春华^{4,5,6}

(1. 凉山彝族自治州林业草原科学研究院, 615000, 四川西昌; 2. 冕宁县蚕业产业发展中心, 615600, 四川冕宁;
3. 西南林业大学, 650224, 昆明; 4. 林业资源高效生产全国重点实验室, 100091, 北京; 5. 中国林业科学
研究院高原林业研究所, 650233, 昆明; 6. 云南元谋干热河谷生态系统国家
定位观测研究站, 650233, 昆明)

摘要: 金沙江干热河谷植被稀疏, 土壤板结, 水土流失严重, 导致该区域生态环境及功能退化。探明金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌丛土壤的水土保持特征, 对该区域植被恢复和水土保持工作具有重要意义。在金沙江干热河谷上、中、下游共设 47 个样地, 通过野外调查、样品采集和室内分析, 研究金沙江干热河谷上、中、下游不同植被类型土壤水土保持特征及影响因素。结果表明: 1) 不同植被类型土壤水土保持能力为: 天然林 > 人工林 > 稀树灌丛; 2) 上、中、下游的水土保持能力为: 上游 > 中游 > 下游, 中、下游土壤水土保持能力差异不显著; 3) 表层与次表层土壤水土保持能力为: 表层 > 次表层。金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌丛土壤水土保持特征因植被生长状态及覆盖度、土壤孔隙度、土壤持水性等因素的异质性表现出较大差异。其中, 人工林下土壤水土保持能力有显著提升, 表明人工造林措施对水土保持及生态恢复具有促进作用。稀树灌丛水土保持能力最差, 在生态恢复和水土保持研究时需重点关注。

关键词: 植被恢复; 水土保持; 土壤孔隙度; 土壤持水性; 干热河谷

中图分类号: S714.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2025)01-0090-12

Effects of vegetation restoration on soil and water conservation characteristics in different zones of the Dry-Hot Valley of the Jinsha River

RUAN Changming¹, MA Shaodong², WANG Bihai¹, WANG Meng³, OU Chaorong³,
SUN Yongyu^{4,5,6}, ZHANG Chunhua^{4,5,6}

(1. Liangshan Academy of Forestry and Grassland, 615000, Xichang, Sichuan, China; 2. The Sericulture Industry Development Center of Mianning County, 615600, Mianning, Sichuan, China; 3. Southwest Forestry University, 650224, Kunming, China; 4. National Key Laboratory of Efficient Production of Forestry Resources, 100091, Beijing, China; 5. Institute of Highland Forest Science, Chinese Academy of Forestry, 650233, Kunming, China; 6. Yuanmou Desert Ecosystem Research Station, 650233, Kunming, China)

收稿日期: 2024-03-11 修回日期: 2024-09-23

项目名称: 云南省自然生态监测项目“元谋干热河谷生态监测”(2023-YN-07); 国家林业和草原局林草科技创新平台项目“云南元谋干热河谷生态系统国家定位观测研究站”(2022132108)

第一作者简介: 阮长明(1996—), 男, 硕士, 研究实习员。主要研究方向: 干热河谷植被恢复与保持。E-mail: 1943802305@qq.com

† 通信作者简介: 孙永玉(1974—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 森林培育和干热河谷植被恢复技术。E-mail: cafs dren@163.com

王 猛(1980—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 森林培育和生态。E-mail: 3638963@qq.com

Abstract: [Background] Severe soil erosion in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River causes significant challenges to the zone's ecological security and functions, seriously affecting social and economic activities. Investigating the soil and water conservation characteristics and influencing factors of natural forests, planted forests, and savanna of valley type in the upper, middle, and lower reaches of the Dry-Hot Valley of the Jinsha River is crucial for soil and water conservation and ecological restoration in this zone. [Methods] In this study, 22 sampling sites were established in the upper reaches, 13 sampling sites in the middle reaches, and 12 sampling sites in the lower reaches. Data were collected through comprehensive field investigations, sample collection, and subsequent laboratory analysis, and the soil and water conservation capacity characteristics and influencing factors of natural forests, planted forests, and savanna of valley type in the upper, middle, and lower reaches were studied. [Results] 1) Natural forests show the best characteristics in terms of surface vegetation, soil porosity, and soil water-holding capacity, resulting in the strongest soil and water conservation ability. In contrast, savanna of valley type are of poor surface vegetation growth, a thin litter layer, low soil porosity, and weak soil water-holding capacity, making them more susceptible to severe soil erosion from rain. Therefore, the soil and water conservation capacity under different vegetation types is natural forests > planted forests > savanna of valley type. 2) Soil density gradually increases from upstream to downstream, while soil porosity, soil water-holding capacity and soil drainage capacity gradually decrease from upstream to downstream. Therefore, the soil and water conservation capacity in the upper, middle, and lower reaches of the Dry-Hot Valley of the Jinsha River is as follows: upper reaches > middle reaches > lower reaches, the difference in soil water conservation capacity between the middle and lower reaches is not significant ($P > 0.05$). 3) The characteristics of soil porosity and soil water-holding capacity of the surface layer (0–15 cm) are superior to the subsurface layer (15–30 cm) in different sections of the Dry-Hot Valley of the Jinsha River. Therefore, the soil and water conservation capacity of surface and subsurface layers soils in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River is as follows: surface layer > subsurface layer. [Conclusions] The soil under planted forests shows substantial improvement compared to savanna of valley type in terms of vegetation growth state, coverage, soil porosity, and soil water-holding capacity. This indicates that artificial afforestation measures effectively promote soil and water conservation and ecological restoration in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River, indicating that it is an effective measure for preventing and controlling soil and water loss.

Keywords: vegetation recovery; water and soil conservation; soil porosity; soil water-holding capacity; Dry-Hot Valley

金沙江干热河谷是我国干热河谷最集中连片的地区^[1],其生态系统具有脆弱性和不稳定性,高强度的人为活动及复杂的气候变化导致该区域的生态环境退化严重,为我国生态环境退化的典型地区之一^[2]。水土流失是金沙江干热河谷生态环境退化的主要形式之一^[3],地表板结、植被退化、降水集中等原因导致该地区水土流失面积达 46.6%,约占整个长江上游地区总流失面积的 36.4%,年输沙量约占宜昌站年输沙量的 45%^[4],给金沙江流域内人民群众的生命财产带来巨大威胁,严重阻碍了该区域的社会经济发展。

植被通过林冠、凋落物及强大的根系能降低地

表水力侵蚀、固土防崩、改善土壤理化性质等^[5],因此,植树造林是治理水土流失的重要措施^[6]。我国从上世纪 50 年代开始就在金沙江干热河谷区域开展了封山育林、植树造林、水土流失治理等生态保护措施及政策^[7],使区域内植被退化、水土流失得到有效治理,提高了生态系统的稳定性^[8]。目前,针对攀枝花、元谋等区域性水土保持、植被恢复等研究取得了不错成绩^[9],但金沙江干热河谷上、中、下游环境的空间异质性导致各区段的植被恢复与水土保持等措施及效益具有一定差异性^[10]。为更科学、系统地分析金沙江干热河谷水土保持特征及其影响因素,笔者对金沙江干热河谷上、中、下游的稀

树灌草丛、人工林和天然林开展调查研究,分析金沙江干热河谷不同区域植被恢复类型的植被、土壤特征对水土保持效益的影响,以期为金沙江干热河谷植被恢复与水土流失治理提供研究依据。

1 研究区概况

研究区地处西南横断山区河谷深切后形成的大断裂带上,西至云南省永胜县,东至四川省布拖县,覆盖面积超 2.9 万 km²。气候属于季风型的河谷干热气候,雨季(6—10 月)高温多雨,降水占全年 80% 以上,旱季(11 月—翌年 5 月)降水稀少,仅为全年降水的 8%~18%,干旱持续时间达半年以上。气候炎热干燥,导致年均蒸发量(2 750~3 850 mm)是年均降雨量(600~800 mm)的 4~6 倍,年均干燥度达 2.0 以上。植被稀疏,以耐旱型植被为主。土壤贫瘠、板结,水土流失现象严重。

2 材料与方法

2.1 样地设置

2021 年 1 月,根据野外调查情况,结合实验设计要 求,在金沙江干热河谷上、中、下游选取土壤、植被、气候等环境因子相近的样地进行调查采样^[11]。本次调查共设样地 47 个(图 1),分别在上游永胜县和鹤庆县设置 22 个样地,在中游攀枝花市和元谋县设置 13 个样地,在下游东川区和宁南县设置 12 个样地。(下游江边大部分稀树灌草丛被水电站蓄水淹没,无法调查其稀树灌草丛样地,淹没区以上区域稀树灌草丛样地与人工林样地混合分布,因此下游采集人工林样地代表当地植被特征)其中,包括天然林样地 16 个,人工林样地 25 个,稀树灌草丛样地 6 个。每个样地设置 1 个 20 m×20 m 的乔木样方、4 个 5 m×5 m 的灌木样方和 4 个 1 m×1 m 的草本样方。

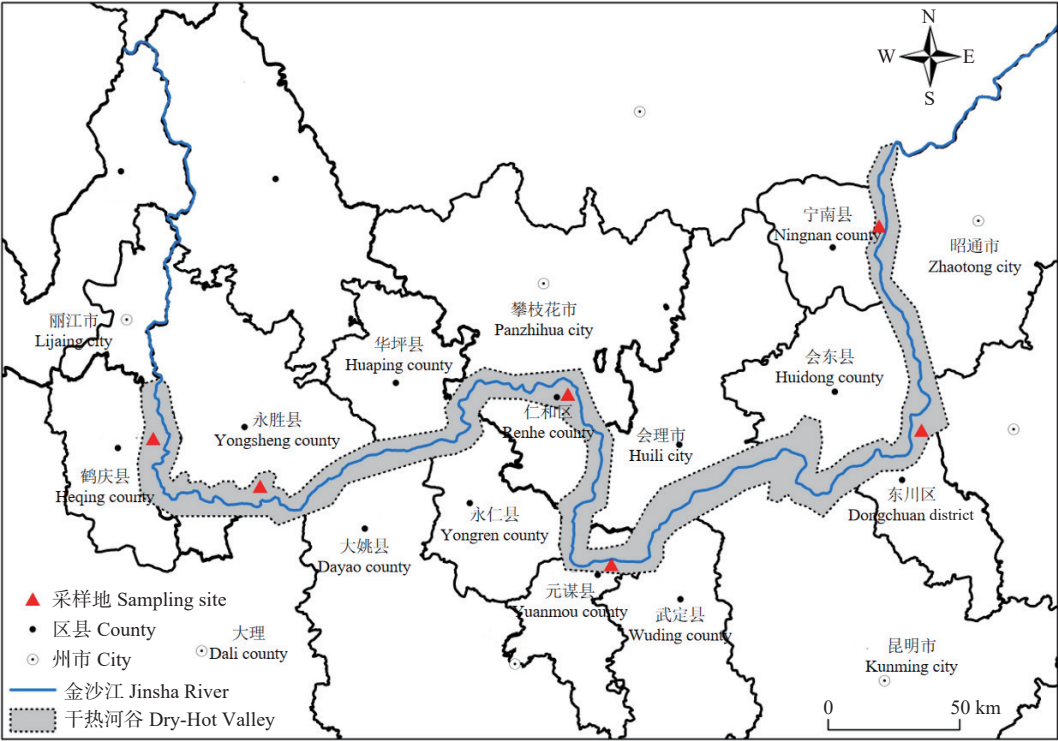


图 1 采样地分布示意图
Fig. 1 Schematic diagram of sampling site distribution

2.2 样品采集

在乔木样方内,通过每木检尺测量胸径,用测高杆测树高,通过树冠投影法测郁闭度;在灌木样方内用皮尺测灌木冠幅并计算盖度、用测高杆测灌木高度,通过收割调查生物量及种类,在草本样方内通过照片法计算覆盖度,通过收割分类调查草本

高度、种类和生物量等。在草本样方内使用环刀、铝盒采集表层(0~15 cm)和次表层(15~30 cm)土壤样品,用于测定土壤持水性和孔隙度等。在草本样方内设 1 个 0.5 m×0.5 m 的小样方,现场测定凋落物厚度,并将样方内凋落物全部收集装入编号的塑料袋密封保存。同时记录样地基本信息、植被特

征及土壤特征等。

2.3 样品测定

使用 LY/T 1215–1999《森林土壤水分-物理性质的测定》标准对土壤持水性和孔隙度等指标进行测定。用天平称空环刀质量(带孔盖, 垫有滤纸), 在样地挖掘土壤剖面后用铝盒、环刀采取表层(0 ~ 15 cm)和次表层(15 ~ 30 cm), 须保持环刀内土壤的结构不受到破坏, 用锋利的土壤刀削平环刀表面, 盖好, 带回实验室测定。将铝盒中部分土壤进行称量并烘干, 计算土壤水分系数。将铝盒中湿土质量与烘干后质量相减, 计算土壤含水率。使用万分天平称量土壤质量并计算土壤水分含量。将土壤浸泡 12 h 后取出立即称量后计算土壤最大持水量。再将称量后的土壤置于干砂上 2 h 后, 称量土壤质量量计算可得土壤毛管持水量。将上述土壤继续放置干砂上 72 h 后称量, 计算得出土壤最小持水量。另外地表乔、灌、草植被覆盖度、地表凋落物厚度等通过实地测量等方法进行调查统计。

2.4 数据分析

使用 Excel 2010 对数据进行分类汇总; 使用 SPSS 23.0 对金沙江干热河谷上、中、下游稀树灌草丛、人工林及天然林的地表植被、枯落物、土壤孔隙度及土壤持水能力特征进行均值和标准差计算及差异显著性分析; 用 Pearson 相关性分析地表植被、枯落物与土壤物理性质的相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同区段植被恢复地表植被、枯落物及土壤特征

由表 1 可见, 金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌草丛的植被高度、覆盖度及枯落物厚度均有一定差异性。不同植被类型下草本高度和草本盖度均表现为: 稀树灌草丛 > 天然林 > 人工林; 不同区段草本高度为: 中游 > 上游 > 下游, 不同区段草本盖度表现为: 上游 > 中游 > 下游。上游人工林灌木高度及盖度均为最大, 稀树灌草丛灌

表 1 不同区段植被恢复地表植被及枯落物特征

Tab. 1 Characteristics of vegetation and litter in different zones of vegetation restoration								
区段 Zone	植被类型 Vegetation type	枯落物厚度 Thickness of litter/cm	草本盖度 Herbal coverage/%	草本高度 Herbal height/ cm	灌木盖度 Shrub coverage/%	灌木高度 Shrub height/ m	乔木郁闭度 Canopy density of arbor	乔木高度 Arbor height/ m
上游 Upstream	天然林 Natural forest	1.51 ± 0.59a	66.67 ± 8.77b	60.74 ± 7.21a	15.50 ± 4.71b	1.43 ± 0.21a	0.42 ± 0.07a	2.45 ± 0.27a
	人工林 Planted forest	1.01 ± 0.20a	59.50 ± 6.99b	60.33 ± 10.05a	48.56 ± 8.61a	1.75 ± 0.14a	0.16 ± 0.03b	4.82 ± 1.45a
	稀树灌草丛 Savanna of valley type	0.24 ± 0.09a	87.50 ± 2.50a	73.76 ± 11.95a	10.75 ± 2.17b	1.60 ± 0.23a	0.09 ± 0.05b	1.45 ± 1.26a
	平均值 Average	1.07 ± 0.26	67.52 ± 4.95	63.16 ± 5.55	28.16 ± 5.37	1.61 ± 0.11	0.25 ± 0.04	3.24 ± 0.69
中游 Midstream	天然林 Natural forest	2.20 ± 0.41a	70.00 ± 11.40a	80.32 ± 7.08a	52.00 ± 12.61a	2.30 ± 0.12a	0.43 ± 0.15a	3.38 ± 1.46ab
	人工林 Planted forest	1.72 ± 0.35ab	56.33 ± 6.15a	72.93 ± 5.58a	25.00 ± 8.16b	1.30 ± 0.35ab	0.42 ± 0.11a	5.56 ± 1.04a
	稀树灌草丛 Savanna of valley type	0.40 ± 0.30b	75.00 ± 0.01a	81.46 ± 9.05a	22.50 ± 17.50b	0.30 ± 0.30b	—	—
	平均值 Average	1.70 ± 0.28	65.62 ± 5.51	77.08 ± 3.83	35.00 ± 7.23	1.47 ± 0.27	0.36 ± 0.08	3.87 ± 0.89
下游 Downstream	天然林 Natural forest	1.50 ± 0.50a	72.50 ± 12.50a	77.06 ± 19.86a	35.00 ± 20.00a	1.00 ± 0.01a	0.63 ± 0.03a	6.75 ± 1.45a
	人工林 Planted forest	1.00 ± 0.07b	60.50 ± 5.65a	56.17 ± 4.78b	24.20 ± 7.05b	1.29 ± 0.16a	0.41 ± 0.05b	6.95 ± 1.13a
	平均值 Average	1.08 ± 0.10	62.50 ± 5.09	59.65 ± 5.19	26.00 ± 6.44	1.24 ± 0.13	0.44 ± 0.05	6.92 ± 0.95

注: 不同小写字母表示各指标差异显著($P < 0.05$)。中游稀树灌草丛植被样方中无乔木, 其乔木郁闭度和乔木高度没有数据, 用—表示。
Notes: Different lowercase letters indicate significant differences in each index ($P < 0.05$). There is no trees in the vegetation sample plots in the savanna of valley type of the midstream, thus the data of arbor heights are not available and are indicated by —.

木盖度最低,天然林灌木高度最低;中游灌木高度及盖度均为:天然林>人工林>稀树灌草丛;下游天然林灌木盖度最高,人工林灌木高度最高;不同区段灌木盖度为:中游>上游>下游,不同区段灌木高度为:上游>中游>下游。不同植被类型乔木郁闭度均表现为:天然林>人工林>稀树灌草丛;不同植被恢复类型乔木高度表现为:人工林>天然林>稀树灌草丛;不同区段乔木郁闭度及高度均表现为:下游>中游>上游。不同植被恢复类型枯落物厚度表现为:天然林>人工林>稀树灌草丛,不

同区段枯落物厚度为中游>下游>上游。

金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌草丛的土壤特征具有一定差异性(表2)。上游天然林土质以壤土为主,土壤疏松,土壤石粒含量少,根系含量适中;人工林与稀树灌草丛土质以砂土为主,土壤疏松,土壤石粒含量适中,根系含量适中。中游土质均为砂土,土壤疏松,石粒及根系含量适中。下游土质为砂土,土壤疏松,土壤石粒、根系含量适中。上、下游天然林样地平均坡度大于人工林和稀树灌草丛,中游人工林样地坡度则最陡。

表 2 不同区段植被恢复土壤特征

Tab. 2 Soil characteristics of vegetation restoration in different zones

区段 Zone	植被类型 Vegetation type	平均坡度 Mean slope/(°)	土质比例		土壤紧实度比例		石粒含量比例		根系含量比例	
			Proportion of soil/%		Proportion of soil compactness/%		Proportion of stone content/%		Proportion of root content/%	
			壤土	砂土	疏松	紧实	较多	较少	较多	较少
			Loam	Sandy soil	Loose	Compaction	More	Less	More	Less
上游 Upstream	天然林 Natural forest	20.78	55.56	44.44	77.78	22.22	22.22	77.78	22.22	77.78
	人工林 Planted forest	19.33	11.11	88.89	77.78	22.22	11.11	88.89	55.56	44.44
	稀树灌草丛 Savanna of valley type	18.75	25.00	75.00	75.00	25.00	50.00	50.00	25.00	75.00
中游 Midstream	天然林 Natural forest	16.00	0	100.00	40.00	60.00	40.00	60.00	40.00	60.00
	人工林 Planted forest	22.50	0	100.00	83.33	16.67	33.33	66.67	50.00	50.00
	稀树灌草丛 Savanna of valley type	12.50	0	100.00	100.00	0	50.00	50.00	50.00	50.00
下游 Downstream	天然林 Natural forest	20.00	0	100.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
	人工林 Planted forest	14.00	0	100.00	80.00	20.00	40.00	60.00	50.00	50.00

注:表中数值(除平均坡度)均为土壤特征占各区段的比例。Notes: Values in the table (except for the average slope) are the percentage of soil characteristics in each zone.

3.2 不同区段植被恢复土壤孔隙度特征

由表3可知,金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌草丛的表层土壤孔隙度特征具有一定差异性。上游地区土壤密度为稀树灌草丛>天然林>人工林,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均为人工林>天然林>稀树灌草丛,土壤通气度为天然林>稀树灌草丛>人工林。中游地区土壤密度为稀树灌草丛>人工林>天然林,土壤总孔隙度为人工林>天然林>稀树灌草丛,土壤非毛管孔隙度为天然林>人工林>稀树灌草丛,土壤毛管孔隙度和通气度在天然林、人工林及稀树灌草

丛间差异性较小。下游土壤密度为人工林>天然林,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、通气度均为天然林>人工林。各区段土壤密度表现为下游>中游>上游,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、通气度均为上游>中游>下游。

金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌草丛土壤孔隙度特征在表层与次表层的变化基本保持一致,但不同土层间具有一定差异。其中,金沙江干热河谷上、中、下游次表层土壤密度较表层土壤密度分别增加0.21、0.29和0.30 g/cm³,次表层土壤总孔隙度较表层土壤总孔隙度分别减少

表 3 不同区段植被恢复表层、次表层土壤孔隙度特征

Tab. 3 Surface and subsurface soil porosity characteristics of vegetation restoration in different zones

土层 Soil layer	区段 Zone	植被类型 Vegetation type	土壤密度 Soil density/ (g·cm ⁻³)	土壤总孔隙度 Total soil porosity/%	土壤毛管孔隙度 Soil capillary porosity/%	土壤非毛管孔隙度 Soil noncapillary porosity/%	土壤通气度 Soil permeability/%
表层土壤 Surface soil (0 ~ 15 cm)	上游 Upstream	天然林 Natural forest	1.08 ± 0.01A	59.29 ± 0.43A	49.15 ± 1.03A	10.14 ± 0.75A	39.28 ± 0.42A
		人工林 Planted forest	1.03 ± 0.02A	61.14 ± 0.84A	49.89 ± 0.85A	11.25 ± 0.65A	37.04 ± 0.61B
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	1.09 ± 0.03A	58.99 ± 0.97A	48.98 ± 0.84A	10.00 ± 0.51A	38.66 ± 0.27AB
		平均值 Average	1.06 ± 0.01	59.99 ± 0.46	49.42 ± 0.55	10.57 ± 0.42	38.25 ± 0.37
	中游 Midstream	天然林 Natural forest	1.19 ± 0.01A	54.95 ± 0.23A	46.58 ± 0.33A	8.37 ± 0.32A	36.55 ± 0.15A
		人工林 Planted forest	1.19 ± 0.01A	55.17 ± 0.47A	47.22 ± 0.19A	7.95 ± 0.35A	36.89 ± 0.26A
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	1.22 ± 0.01A	53.78 ± 0.47A	47.17 ± 0.53A	6.61 ± 0.06B	36.45 ± 0.33A
		平均值 Average	1.20 ± 0.01	54.87 ± 0.27	46.96 ± 0.18	7.91 ± 0.26	36.69 ± 0.14
	下游 Downstream	天然林 Natural forest	1.31 ± 0.06A	50.60 ± 2.23A	44.38 ± 2.22A	6.23 ± 0.01A	33.85 ± 1.92A
		人工林 Planted forest	1.33 ± 0.02A	49.68 ± 0.65A	42.76 ± 0.87A	6.92 ± 0.32A	33.00 ± 0.54A
		平均值 Average	1.33 ± 0.02	49.83 ± 0.62	43.03 ± 0.79	6.80 ± 0.28	33.14 ± 0.52
	上游 Upstream	天然林 Natural forest	1.28 ± 0.02ab	51.55 ± 0.6ab	39.24 ± 1.64a	12.31 ± 1.19a	29.91 ± 0.58a
		人工林 Planted forest	1.22 ± 0.03b	53.96 ± 1.24a	40.75 ± 1.21a	13.21 ± 0.65a	27.81 ± 0.22b
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	1.34 ± 0.03a	49.47 ± 1.09b	35.47 ± 0.76a	14.00 ± 1.35a	28.51 ± 0.72ab
		平均值 Average	1.27 ± 0.02	52.24 ± 0.69	39.28 ± 0.93	12.96 ± 0.59	28.80 ± 0.35
次表层土壤 Subsurface soil (15 ~ 30 cm)	中游 Midstream	天然林 Natural forest	1.48 ± 0.02a	44.28 ± 0.83a	33.23 ± 0.77a	11.04 ± 0.28a	24.32 ± 0.79a
		人工林 Planted forest	1.49 ± 0.03a	43.66 ± 1.08a	32.76 ± 1.02a	10.90 ± 0.57a	24.07 ± 0.98a
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	1.55 ± 0.01a	41.73 ± 0.11a	30.71 ± 1.05a	11.02 ± 0.94a	22.61 ± 0.02a
		平均值 Average	1.49 ± 0.02	43.60 ± 0.59	32.62 ± 0.58	10.98 ± 0.27	23.93 ± 0.52
	下游 Downstream	天然林 Natural forest	1.56 ± 0.01a	41.14 ± 0.22a	31.16 ± 0.46a	9.98 ± 0.69a	21.7 ± 0.49a
		人工林 Planted forest	1.64 ± 0.02a	38.16 ± 0.85a	30.75 ± 1.09a	7.42 ± 0.61a	19.97 ± 0.78a
		平均值 Average	1.63 ± 0.02	38.54 ± 0.83	30.80 ± 0.94	7.74 ± 0.62	20.18 ± 0.71
	上游 Upstream	天然林 Natural forest	1.28 ± 0.02ab	51.55 ± 0.6ab	39.24 ± 1.64a	12.31 ± 1.19a	29.91 ± 0.58a
		人工林 Planted forest	1.22 ± 0.03b	53.96 ± 1.24a	40.75 ± 1.21a	13.21 ± 0.65a	27.81 ± 0.22b
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	1.34 ± 0.03a	49.47 ± 1.09b	35.47 ± 0.76a	14.00 ± 1.35a	28.51 ± 0.72ab
		平均值 Average	1.27 ± 0.02	52.24 ± 0.69	39.28 ± 0.93	12.96 ± 0.59	28.80 ± 0.35
	中游 Midstream	天然林 Natural forest	1.48 ± 0.02a	44.28 ± 0.83a	33.23 ± 0.77a	11.04 ± 0.28a	24.32 ± 0.79a
		人工林 Planted forest	1.49 ± 0.03a	43.66 ± 1.08a	32.76 ± 1.02a	10.90 ± 0.57a	24.07 ± 0.98a
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	1.55 ± 0.01a	41.73 ± 0.11a	30.71 ± 1.05a	11.02 ± 0.94a	22.61 ± 0.02a
		平均值 Average	1.49 ± 0.02	43.60 ± 0.59	32.62 ± 0.58	10.98 ± 0.27	23.93 ± 0.52
	下游 Downstream	天然林 Natural forest	1.56 ± 0.01a	41.14 ± 0.22a	31.16 ± 0.46a	9.98 ± 0.69a	21.7 ± 0.49a
		人工林 Planted forest	1.64 ± 0.02a	38.16 ± 0.85a	30.75 ± 1.09a	7.42 ± 0.61a	19.97 ± 0.78a
		平均值 Average	1.63 ± 0.02	38.54 ± 0.83	30.80 ± 0.94	7.74 ± 0.62	20.18 ± 0.71

注：不同大写字母表示不同区段植被恢复表层土壤孔隙度特征差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示不同区段植被恢复次表层土壤孔隙度特征差异显著($P < 0.05$)。Notes: Different uppercase letters indicate significant differences in the surface soil porosity characteristics of vegetation restoration in different zones ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences in the subsurface soil porosity characteristics of vegetation restoration in different zones ($P < 0.05$).

7.74%、11.27% 和 11.29%，次表层土壤通气度较表层土壤通气度分别减少 9.45%、12.76% 和 12.96%。由此可知，随着土层加深，土壤密度逐渐增加，土壤孔隙度和通气度逐渐降低，而中、下游土壤表层与次表层土壤孔隙度特征差异更明显。

3.3 不同区段植被恢复土壤持水能力特征

由表 4 可知，金沙江干热河谷上、中、下游天然林、人工林和稀树灌草丛的表层土壤持水能力具有一定差异。上游天然林的土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤最小持水量、土壤排水能力和土壤自然含水率均表现均为最好，人工林与稀树灌草丛各项指标差异不大。中游地区土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤最小持水量、排水能力和土壤自然含水率均为天然林 > 人工林 > 稀树灌草丛，其中天然林土壤最小持水量和土壤自然含水率显著 ($P < 0.05$) 高于稀树灌草丛。下游土壤各项持水能力均为天然林 > 人工林，但无显著性。上、中、下游土壤平均自然含水率、土壤持水量和土壤排水能力均为上游 > 中游 > 下游，土壤持水能力特征从上游至下游呈现逐渐减小的趋势。

金沙江干热河谷上、中、下游次表层土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤最小持水量、土壤排水能力、土壤自然含水率均表现为天然林 > 人工林 > 稀树灌草丛。对比表层土壤与次表层土壤可发现各区段次表层土壤自然含水率均高于表层土壤自然含水率，次表层土壤持水能力和排水能力均低于表层土壤持水能力和排水能力。由此可知，随土壤厚度增加，土壤自然含水率逐渐增加，土壤持水能力逐渐降低。

3.4 地表植被、枯落物与土壤物理性质相关性

由表 5 可见，金沙江干热河谷土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤最小持水量、土壤排水能力、土壤自然含水率、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度、土壤通气度间均互为极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系，土壤密度与土壤持水量、土壤排水能力、土壤自然含水率、土壤孔隙度、土壤通气度均为极显著 ($P < 0.01$) 负相关关系。土壤持水量、土壤排水能力、土壤自然含水率、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤通气度与样地坡度、枯落物厚度、草本高度、草本盖度、灌木高度、

表 4 不同区段植被恢复表层、次表层土壤持水能力特征

Tab. 4 Characteristics of water-holding capacities of surface and subsurface soil under vegetation restoration in different zones							
土层 Soil layer	区段 Zone	植被类型 Vegetation type	土壤最大持水量 Maximum water- holding capacity of soil/(g·kg ⁻¹)	土壤毛管持水量 Soil capillary water- holding capacity/ (g·kg ⁻¹)	土壤最小持水量 Minimum soil water-holding capacity/(g·kg ⁻¹)	土壤排水能力 Soil drainage capacity/(g·kg ⁻¹)	土壤自然含水率 Natural moisture content of soil/%
表层土壤 Surface soil (0 ~ 15 cm)	上游 Upstream	天然林 Natural forest	574.11 ± 26.36A	464.22 ± 22.56A	419.42 ± 21.14A	154.87 ± 6.62A	15.06 ± 0.87A
		人工林 Planted forest	508.34 ± 10.96A	414.49 ± 7.14A	358.83 ± 7.50B	149.38 ± 5.18A	12.50 ± 0.18B
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	507.25 ± 24.12A	414.75 ± 18.87A	365.28 ± 16.08B	142.03 ± 10.02A	12.71 ± 0.57B
		平均值 Average	535.05 ± 13.87	434.88 ± 11.18	384.79 ± 11.18	150.29 ± 3.82	13.59 ± 0.45
	中游 Midstream	天然林 Natural forest	423.00 ± 6.12A	352.80 ± 3.92A	316.13 ± 2.99A	106.83 ± 3.23A	11.50 ± 0.07A
		人工林 Planted forest	418.50 ± 10.29A	351.50 ± 6.88A	311.86 ± 6.31AB	106.71 ± 3.99A	11.43 ± 0.14A
		稀树灌草丛 Savanna of valley type	388.00 ± 2.00A	334.00 ± 2.00A	292.54 ± 6.67B	95.33 ± 4.43A	10.83 ± 0.09B
		平均值 Average	415.54 ± 6.09	349.31 ± 3.83	310.53 ± 3.82	105.02 ± 2.46	11.36 ± 0.09
	下游 Downstream	天然林 Natural forest	351.50 ± 26.50A	304.00 ± 24.00A	267.50 ± 17.12A	84.09 ± 8.99A	10.47 ± 0.19A
		人工林 Planted forest	344.30 ± 6.84A	292.70 ± 7.79A	253.02 ± 9.60A	91.34 ± 4.13A	10.42 ± 0.07A
		平均值 Average	345.50 ± 6.57	294.58 ± 7.19	255.43 ± 8.36	90.13 ± 3.68	10.43 ± 0.07

续表 4

Continued to Tab. 4

土层	区段	植被类型	土壤最大持水量	土壤毛管持水量	土壤最小持水量	土壤排水能力	土壤自然含水率
Soil layer	Zone	Vegetation type	Maximum water- holding capacity of soil/(g·kg ⁻¹)	Soil capillary water- holding capacity/ (g·kg ⁻¹)	Minimum soil water-holding capacity/(g·kg ⁻¹)	Soil drainage capacity/(g·kg ⁻¹)	Natural moisture content of soil/%
次表层土壤 Subsurface soil (15 ~ 30 cm)	上游 Upstream	天然林	473.96 ± 23.40a	364.89 ± 20.08a	329.75 ± 18.43a	144.21 ± 5.64a	16.34 ± 0.88a
		Natural forest					
		人工林					
		Planted forest					
		稀树灌草丛					
		Savanna of valley type					
		平均值					
		Average	440.51 ± 12.72	337.82 ± 10.18	298.21 ± 10.76	142.30 ± 2.64	14.65 ± 0.51
	中游 Midstream	天然林	345.87 ± 2.70a	270.97 ± 0.43a	237.42 ± 2.10a	108.45 ± 0.90a	12.47 ± 0.05a
		Natural forest					
		人工林					
		Planted forest					
		稀树灌草丛					
		Savanna of valley type					
		平均值					
		Average	338.40 ± 4.61	264.78 ± 3.62	235.49 ± 2.94	102.91 ± 2.18	12.29 ± 0.07
	下游 Downstream	天然林	301.73 ± 2.64a	237.77 ± 1.96a	212.58 ± 0.21a	89.15 ± 2.85a	12.15 ± 0.17a
		Natural forest					
		人工林					
		Planted forest					
		平均值					
		Average	287.21 ± 3.65	239.58 ± 2.43	202.23 ± 3.59	84.98 ± 1.65	11.47 ± 0.13

注：不同大写字母表示不同区段植被恢复表层土壤持水能力特征差异显著($P < 0.05$)，不同小写字母表示不同区段植被恢复次表层土壤持水能力特征差异显著($P < 0.05$)。Notes: Different uppercase letters indicate significant difference in water-holding capacity of surface soil in different zones of vegetation restoration ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference in water-holding capacity of subsurface soil in different zones of vegetation restoration ($P < 0.05$).

灌木盖度、乔木高度均为正相关关系，但无显著性。郁闭度与土壤最大持水量、土壤毛管持水量、土壤最小持水量为显著($P < 0.05$)负相关关系，与土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤密度为显著($P < 0.05$)正相关关系。

4 讨论

4.1 不同区段植被恢复地表植被及土壤特征对水土保持的影响

植被种类、生长状态、林冠结构等对土壤水土保持具有重要影响^[12]。单层或郁闭度差的林分会遭受较强的雨水冲刷，易形成地表径流造成水土流失，多层或郁闭度大的林分能截留部分雨水，有效减小雨水对地表的冲刷，提高土壤抗风蚀、水蚀能力^[13]。枯落物厚度、蓄积量等是地表缓解雨水冲击的重要部分，能使土壤更好的吸收水分，降低地

表径流，对土壤孔隙度、通气度等具有一定保护作用^[14]。植物根系通过挤压、分泌物等促进土壤孔隙的形成，根系多、分布广能有效提高土壤孔隙度和水土保持能力^[15]。金沙江干热河谷夏季炎热多雨，降水常以暴雨的形式，金沙江干热河谷上、中、下游稀树灌草丛的草本高度、草本覆盖度均为最大，但乔木层和灌木层的植被生长状态最差，且地表枯落物最少(表 1)，雨水直接冲击草本层和地表，导致地表容易形成地表径流，降雨浑浊直接堵塞土壤孔隙，雨水下渗能力降低，地表径流直接冲刷土壤形成沟壑，造成大面积水土流失。金沙江干热河谷各区段人工林的乔木、灌木层高度及覆盖度较稀树灌草丛均有较大提高，地表枯落物层积累增大(表 1)，人工林通过乔、灌、草层的缓冲作用能有效降低雨水对地表的冲刷，枯落物层能短暂保存雨水，降低地表雨水的浑浊，促进土壤对雨水的吸收利用，因

表 5 不同区段地表植被、枯落物与土壤物理性质相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of surface vegetation, litter and soil physical properties in different zones

指标 Index	土壤最大 持水量 Maximum water- holding capacity of soil	土壤毛管 持水量 Soil capillary water- holding capacity	土壤最小 持水量 Minimum soil water- holding capacity	土壤排 水能力 Soil drainage capacity	土壤自然 含水率 Natural moisture content of soil	土壤密度 Soil density	土壤总 孔隙度 Total soil porosity	土壤毛管 孔隙度 Soil capillary porosity	土壤非毛 管孔隙度 Soil noncapillary porosity	土壤通 气度 Soil permeability
土壤毛管持水量 Soil capillary water-holding capacity	0.987**	1.000								
土壤最小持水量 Minimum soil water-holding capacity	0.983**	0.982**	1.000							
土壤排水能力 Soil drainage capacity	0.915**	0.877**	0.825**	1.000						
土壤自然含水率 Natural moisture content of soil	0.931**	0.934**	0.944**	0.788**	1.000					
土壤密度 Soil density	-0.956**	-0.959**	-0.942**	-0.870**	-0.843**	1.000				
土壤总孔隙度 Total soil porosity	0.956**	0.959**	0.942**	0.870**	0.843**	-0.900**	1.000			
土壤毛管孔隙度 Soil capillary porosity	0.762**	0.834**	0.782**	0.624**	0.688**	-0.887**	0.887**	1.000		
土壤非毛管孔隙度 Soil noncapillary porosity	0.803**	0.699**	0.743**	0.837**	0.683**	-0.702**	0.702**	0.294*	1.000	
土壤通气度 Soil permeability	0.554**	0.557**	0.513**	0.577**	0.265	-0.743**	0.743**	0.732**	0.408**	1.000
样地坡度 Slope of plot	0.165	0.150	0.127	0.228	0.069	0.144	0.144	0.066	0.196	0.172
枯落物厚度 Thickness of litter	0.043	0.026	0.053	0.017	0.033	0.073	0.073	0.289*	-0.294*	0.172
草本高度 Herbal height	0.118	0.108	0.034	0.286	0.119	0.091	0.091	0.050	0.111	0.014
草本盖度 Herbal coverage	0.025	0.071	0.011	0.054	0.162	0.026	0.026	0.145	0.169	0.154
灌木高度 Shrub height	0.338*	0.300	0.347*	0.280	0.330*	0.297	0.297	0.143	0.409**	0.118
灌木盖度 Shrub coverage	0.105	0.105	0.168	0.045	0.214	0.102	0.102	0.097	0.062	0.084
乔木高度 Arbor height	0.170	0.116	0.119	0.262	0.015	0.247	0.247	0.116	-0.331*	-0.423**
乔木郁闭度 Canopy density of arbor	-0.309*	-0.321*	-0.302*	0.286	0.278	0.337*	0.337*	0.334*	0.183	0.258

注: *表示差异达显著水平($P < 0.05$), **表示差异达极显著水平($P < 0.01$)。Notes: * indicates a significant difference ($P < 0.05$), and ** indicates a very significant difference ($P < 0.01$).

此,金沙江干热河谷区域人工造林是减小水土流失的有效措施。金沙江干热河谷各区段天然林的乔、灌层生长状态最好,样地郁闭度最大,地表枯落物层最厚,是金沙江干热河谷植被恢复和土壤水土保持效益最好的植被类型,天然林的物种组成、植被生长状态等对金沙江干热河谷植被恢复与水土保持具有重要的参考意义。

金沙江干热河谷上游土质以壤土、砂土为主,土壤疏松,有利于植被生长和根系发育,促进了地表枯落物的积累和土壤孔隙的形成,对防止水土流

失有较好的促进作用。中、下游以砂土为主,土壤紧实、石粒较多,植被根系容易集中于表层,导致土壤孔隙较浅,不利于降水和地表径流渗入土壤,暴雨气候条件下容易形成地表径流并导致水土流失,因此,金沙江干热河谷上游土壤水土保持能力优于中、下游。

4.2 不同区段植被恢复土壤孔隙度特征对水土保持的影响

土壤密度、孔隙度、通气度等是土壤重要的物理性质,决定了土壤的质地、结构、透气性、蓄排水能力等,对水土保持具有重要影响^[16]。土壤密度越小,土壤的通透性和疏松程度越高^[17]。土壤总孔隙度越大,土壤吸收、储存雨水的能力越强,水分可以通过毛细管孔隙快速到达土壤深层,减少地表径流,同时将水分储存较深的土层供植被吸收利用^[18]。土壤非毛管孔隙则通过水分渗透来吸收和储存水分,主要作用在表层土壤,随着土壤的加深土壤渗透效果逐渐减弱^[19]。本研究发现,金沙江干热河谷天然林土壤密度最小,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤通气度均为最大(表 3)。由此可知,天然林对水分的吸收和储存能力最好,其水土保持能力最好。稀树灌草丛土壤密度最大,土壤孔隙度最小,表明稀树灌草丛土壤对水分的吸收、利用能力最差,其水土保持能力最差。人工林土壤孔隙度和土壤通气度相比稀树灌草丛有明显提高,表明人工造林措施能够有效的提高土壤对水分的吸收、利用能力,是降低水土流失的重要措施。

金沙江干热河谷上游土壤密度小,土壤孔隙度和土壤通气度均高于中、下游(表 3),表明上游土壤对雨水的吸收、利用、转移等能力优于中、下游地区;下游的土壤密度最大,土壤孔隙度和土壤通气度最小,其土壤水土保持能力最差。金沙江干热河谷上、中、下游次表层土壤的密度高于表层土壤密度,次表层土壤孔隙度和土壤通气度低于表层土壤孔隙度和土壤通气度,表明随着土层深度增加,土壤对水分的吸收、搬运能力减弱,土壤的水土保持能力也随之减弱。其中,金沙江干热河谷中、下游地区表层与次表层土壤的水土保持能力差异较大,在今后开展植被恢复与水土保持工作中需更加注重中、下游地区土壤深度变化带来的差异性。

4.3 不同区段植被恢复土壤持水能力特征对水土保持的影响

土壤持水性特征是土壤水源涵养和水土保持能力的重要指标之一^[20]。土壤持水性能反映土壤

吸收水和滞留水的能力^[21],土壤持水性越强,能吸收和滞留的水分越多,对降低水土流失的作用越明显。土壤排水能力能反映土壤吸引和排出水分的能力,是研究洪涝灾害、水土流失等重要指标^[22]。土壤自然含水率一定程度反映土壤水分和持水特征,较小的环境变化都会引起土壤自然含水率的改变^[23]。本研究发现,金沙江干热河谷天然林土壤的自然含水率、最大持水量、毛管持水量、最小持水量及排水能力等指标均强于人工林和稀树灌草丛(表 4),在降雨强烈时期能更有效的降低水土流失的发生。稀树灌草丛土壤持水能力和土壤排水能力最差,不能有效吸收、滞留和转移水分,容易形成地表径流,增加了水土流失的发生风险。

金沙江干热河谷上游土壤自然含水率、土壤持水量和土壤排水能力均为最好(表 4),土壤对水分的吸收、存储和转移能力最强;中、下游地区土壤密度增大,土壤孔隙度减小,导致中、下游土壤持水性、排水能力较弱。金沙江干热河谷上、中、下游土壤逐渐加深,土壤的自然含水率增加,但土壤的各项持水能力和排水能力下降。其原因是金沙江干热河谷气候炎热干燥,表层土壤受太阳照射强度大,导致地表水分蒸发强烈,而深层土壤能够避免太阳直射,土壤自然含水量得到提升;但随土层的加深,土壤密度逐渐增加,土壤孔隙度逐渐减小,导致深层土壤的持水性及排水能力下降。

5 结论

1)金沙江干热河谷不同植被类型的土壤水土保持能力表现为:天然林 > 人工林 > 稀树灌草丛。天然林的地表植被特征、土壤孔隙度特征和土壤持水性特征均为最好,其土壤水土保持能力最强;稀树灌丛地表植被生长发育差,地表凋落物层薄,土壤孔隙度特征差,土壤持水能力弱,容易遭受雨水强烈冲刷,造成严重的水土流失。

2)金沙江干热河谷土壤密度从上游至下游逐渐增大,土壤孔隙度、土壤持水性和土壤排水能力从上游至下游逐渐减小,导致土壤保持能力表现为:上游 > 中游 > 下游,但中、下游土壤水土保持能力差异不大。

3)金沙江干热河谷表层与次表层土壤水土保持能力表现为:表层 > 次表层。表层土壤密度小,土壤孔隙度大,土壤持水量大,土壤排水能力强,对雨水的吸收、搬运能力强,土壤的水土保持能力强。

6 参考文献

- [1] 张荣祖. 横断山区干旱河谷 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1.
- ZHANG Rongzu. The dry valleys of the Hengduan mountains region [M]. Beijing: Science Press, 1992: 1.
- [2] 孙永玉, 欧朝蓉, 邓志华. 加强金沙江干热河谷区生态保护与修复工作的思考 [J]. 社会主义论坛, 2023(10): 34.
- SUN Yongyu, OU Chaorong, DENG Zhihua. Consideration on strengthening ecological protection and restoration in the dry-hot valley area of Jinsha River [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2023(10): 34.
- [3] 吴云飞. 金沙江干热河谷区水土流失成因及防治对策 [J]. 山西水土保持科技, 2014(2): 4.
- WU Yunfei. Causes of soil and water loss and countermeasures in dry and hot valley of Jinsha River [J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2014(2): 4.
- [4] 李昆, 刘方炎, 杨振寅, 等. 中国西南干热河谷植被恢复研究现状与发展趋势 [J]. 世界林业研究, 2011, 24(4): 55.
- LI Kun, LIU Fangyan, YANG Zhenyin, et al. Study status and trends of vegetation restoration of dry-hot valley in Southwest China [J]. World Forestry Research, 2011, 24(4): 55.
- [5] 张雄一, 邵全琴, 宁佳, 等. 三北工程区植被恢复对土壤风蚀的影响及植被恢复潜力研究 [J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(11): 2153.
- ZHANG Xiongyi, SHAO Quanqin, NING Jia, et al. Effect of vegetation restoration on soil wind erosion and vegetation restoration potential in the Three-North Afforestation Program [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(11): 2153.
- [6] WEN Xin, DENG Xiangzheng, ZHANG Fan. Scale effects of vegetation restoration on soil and water conservation in a semi-arid region in China: Resources conservation and sustainable management [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 151: 104474.
- [7] 李强. 金沙江干热河谷生态环境特征与植被恢复关键技术研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 1.
- LI Qiang. Researches on eco-environment features and vegetation restoration technologies in Dry-Hot Valley of Jinshajiang River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 1.
- [8] 段青松, 王金霞, 杨旻, 等. 金沙江干热河谷乡土草本植物根系提高土体抗剪强度及其模型预测 [J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 87.
- DUAN Qingsong, WANG Jinxia, YANG Yang, et al. Soil anti-shear strength enhancement by indigenous herbaceous roots in Dry-hot Valley of Jinsha River and its modeling prediction [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(4): 87.
- [9] 余杭, 高若允, 杨文嘉, 等. 干热河谷优势草本植物叶片、根系与土壤碳氮磷含量及其关系 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3): 727.
- YU Hang, GAO Ruoyun, YANG Wenjia, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of leaf, root, and soil and their relationships in dominant herbaceous plants in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(3): 727.
- [10] 阮长明, 杜寿康, 孙永玉, 等. 金沙江干热河谷不同区段土壤碳氮磷化学计量和酶活性研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2486.
- RUAN Changming, DU Shoukang, SUN Yongyu, et al. Stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus and soil enzyme activity at various reaches of the Dry-Hot Valley of Jinsha River [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(11): 2486.
- [11] 阮长明, 唐国勇, 杜寿康, 等. 金沙江干热河谷不同海拔土壤碳氮磷化学计量和酶活性研究 [J]. 西南农业学报, 2023, 36(11): 2464.
- RUAN Changming, TANG Guoyong, DU Shoukang, et al. Stoichiometry of soil carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activities at various elevations in the Dry-Hot Valley of the Jinsha River [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(11): 2464.
- [12] LIU Yu, ZHAO Lirong, LIU Yifan, et al. Restoration of a hillslope grassland with an ecological grass species (*Elymus tangutorum*) favors rainfall interception and water infiltration and reduces soil loss on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Catena, 2022, 219: 106632.
- [13] 王淑春, 程然然, 杜盛. 黄土丘陵区 2 种典型林分降雨分配特征及其主要影响因素 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 173.
- WANG Shuchun, CHENG Ranran, DU Sheng. Characteristics and main influencing factors of rainfall partitioning in two typical forests in the loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 173.
- [14] HAO Haoxin, QIN Jiahui, SUN Zhaoxiang, et al. Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils [J]. Catena, 2021, 203: 105378.
- [15] HAN Dandan, DENG Jingcheng, GU Chaojun, et al. Effect of shrub-grass vegetation coverage and slope

gradient on runoff and sediment yield under simulated rainfall[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2021, 36(1):29.

[16] 王晨光, 曹文华, 马波, 等. 不同根系构型草本与灌木复合对土壤饱和导水率的影响因素分析及模拟 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 10.
WANG Chenguang, CAO Wenhua, MA Bo, et al. Analysis and simulation of factors affecting soil saturated hydraulic conductivity by combinations of grasses and shrubs with different root configurations[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4): 10.

[17] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6580.
WANG Linjiao, WANG Pan, SHENG Maoyin. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6580.

[18] 杨倩, 刘目兴, 王苗苗, 等. 武汉市典型绿地植被类型对表层土壤入渗和持水性能的影响 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1324.
YANG Qian, LIU Muxing, WANG Miaomiao, et al. Characterization of surface soil water infiltration and retention capacity in urban green space of Wuhan city[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(6): 1324.

[19] 余梦舒, 李雅平, 刘青, 等. 不同结构城市绿地土壤渗透性影响研究 [J]. 江西农业学报, 2021, 33(6): 49.
YU Mengshu, LI Yaping, LIU Qing, et al. Study on influence of soil permeability of urban green space with different structure[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(6): 49.

[20] 杨玥, 方建波, 刘小玲, 等. 广东流溪河 5 种林分的枯落物与土壤持水性 [J]. 林业与环境科学, 2018, 34(2): 90.
YANG Yue, FANG Jianbo, LIU Xiaoling, et al. Water-holding capacity of litter and soil in five types of forests in Liuxihe[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2018, 34(2): 90.

[21] 李源, 宋维峰, 马建刚. 中国西南水梯田土壤水分特性研究: 以哈尼梯田为例 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 160.
LI Yuan, SONG Weifeng, MA Jiangang. Soil moisture characteristics of water terrace in Southwest China : A case study of Hani Terraces[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 160.

[22] 姚月锋, 何文, 曾丹娟. 漓江流域洪涝灾害风险评估 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 122.
YAO Yuefeng, HE Wen, ZENG Danjuan. Assessment of flood risk in Lijiang River watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 122.

[23] 靳小莲, 赵巍, 李梦迪, 等. 黄土高原退耕还草土壤水分对植物地上部化学计量特征的影响 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 57.
JIN Xiaolian, ZHAO Wei, LI Mengdi, et al. Effects of soil moisture on the stoichiometric characteristics of aboveground plants following conversion of farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 57.