

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.007; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.007.

王思缘, 叶帆, 赵丽, 等. 岷江上游林树下线及其生态交错带土壤水分对林树下线下移的响应[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):427-434.

Wang Siyuan, Ye Fan, Zhao Li, et al. Response of soil moisture to downward shift of lower timberline and its ecotone in upper reaches of Minjiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):427-434.

岷江上游林树下线及其生态交错带 土壤水分对林树下线下移的响应

王思缘, 叶帆, 赵丽, 李富程, 吴莉娟

(西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: [目的] 阐明林树下线的控制土壤水分含量及其环境影响因素, 为岷江上游林树下线区域植被恢复与生态保护提供科学依据。[方法] 采用野外定位试验与室内试验相结合的方法, 选取岷江上游杂谷脑河流域具有代表性的三寨村林树下线及其生态交错带为研究区域, 研究土壤水分含量、土壤物理性质及其相互作用关系。[结果] (1) 林树下线生态交错带总毛管孔隙度和毛管孔隙度随海拔升高而增大, 非毛管孔隙度随海拔升高而减小, 林树下线区域呈现相反的变化趋势; 孔隙度表层土显著高于深层土 ($p < 0.05$)。 (2) 林树下线及其生态交错带土壤持水性均随海拔梯度升高而增大, 但随着土层深度的增加而降低。 (3) 林树下线及生态交错带土壤水分范围分别为 18%~24% 和 14%~16%, 土壤水分含量随土层深度的增加而显著递减, 森林土壤水分含量大于灌丛土壤水分含量, 受到植被、地形等因素的影响, 林树下线及生态交错带土壤水分含量随海拔高度变化呈现相反趋势。 (4) 通过主成分和相关性分析, 土壤水分与植被生长受到土壤孔隙度和持水量的显著影响。[结论] 林树下线土壤水分含量受孔隙度、持水量及植被、地形共同影响, 植被恢复中应利用立地条件与造林类型优势, 将土壤水分控制在 18% 以上并从高海拔向交错带逐步推进。

关键词: 生态恢复; 土壤水分; 毛细孔隙; 林树下线

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0427-08

Response of soil moisture to downward shift of lower timberline and its ecotone in upper reaches of Minjiang River

Wang Siyuan, Ye Fan, Zhao Li, Li Fucheng, Wu Lijuan

(School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to identify the soil moisture content controlling the lower timberline and its environmental influencing factors, providing a scientific basis for vegetation restoration and ecological protection in the lower timberline area of the upper reaches of the Minjiang River. [Methods] A combination of field positioning experiments and laboratory tests was employed. The representative lower timberline and its ecotone in Sanzhai Village, Zagunao River Basin (upper reaches of the Minjiang River), were selected as the study area to investigate soil moisture content, soil physical properties, and their interactions. [Results] (1) In the ecotone of the lower timberline, total capillary porosity and capillary porosity increased with altitude, while non-capillary porosity decreased with altitude. The lower timberline area showed an opposite trend. The porosity of surface soil was significantly higher than that of deep soil ($p < 0.05$). (2) The soil water-holding capacity of both the lower timberline and its ecotone increased with rising altitudinal gradient, but decreased with increasing soil depth. (3) The soil moisture content ranged from 18% to 24% in the lower timberline and from 14% to 16% in the ecotone. It decreased significantly with increasing soil depth. The soil moisture content in the forest was

收稿日期: 2024-10-22

修回日期: 2025-03-31

接受日期: 2025-04-20

资助项目: 四川省科技厅自然科学基金项目“岷江上游林树下线生态交错带土壤毛细孔隙结构与毛管水容量的耦合机制”(2022NSFSC1168)

第一作者: 王思缘(2000—), 男, 四川自贡人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态环境质量与变化方面的研究。E-mail: 18181550886@163.com

通信作者: 赵丽(1981—), 女, 四川南充人, 博士, 主要从事土壤生态环境质量与变化方面的研究。E-mail: zhaoli@153.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

greater than that in the shrubs. Influenced by factors such as vegetation and topography, the soil moisture content in the lower timberline and the ecotone showed opposite trends with altitude. (4) Principal component analysis and correlation analysis revealed that soil moisture and vegetation growth were significantly influenced by soil porosity and water-holding capacity. [Conclusion] The soil moisture content at the lower timberline is jointly influenced by porosity, water-holding capacity, vegetation, and topography. For vegetation restoration, the advantages of site conditions and afforestation types should be utilized to maintain soil moisture above 18% and gradually promote restoration from high altitudes to the ecotone.

Keywords: ecological restoration; soil moisture; capillary porosity; lower timberline

山地的林树线、高山雪线、冻土地带线是生态环境变化的“特征敏感线”,开展这些特征线(带)的定位观测与比对研究,可以快速有效地发现和揭示山地自然过程与人类活动相互作用过程及机理^[1]。林线是指高山森林和高山冻原带之间郁闭森林的上限,是一个过渡带^[1]。树线是指树木在垂直地带能够生长的海拔高度上线^[2-3],这两种线一般称为林树上线,主要受到温度的控制。林树下线是指岷江上游干旱河谷区2 200 m左右的小叶灌丛与落叶阔叶林及孤立“树岛”混合交错带,影响下线的主要因子是湿度^[4-5]。林树下线生态交错带是指林树下线向上延伸一定森林区域与向下延伸一定干旱河谷灌丛区域的受土壤水分垂直变化影响而形成一种特殊的生态交错区。

土壤水分是森林生态系统养分循环和能量流动的载体之一,直接影响土壤的特性和植物的生长分布,是“特征敏感线”的指示关键因子^[6]。土壤水分研究主要关注于土壤水运动的新方法、土壤水平衡模型、定位或半定位的土壤水分动态观测和研究、土壤水溶质运移、水盐运移方程、土壤水分空间异质性等方面的研究^[7-8]。森林土壤水分研究主要关注于林地土壤水分和林木生长的关系、森林土层的水分贮量及影响因素、森林土壤水分空间异质性及其影响因素^[9-10]。

林树下线生态交错带主要分布于岷江上游山地森林与干旱河谷交错带,该交错带是我国西南地区重要的生态交错带,能有效阻止干旱河谷扩大,遏制山地森林的进一步退化。关于岷江上游土壤水分的研究主要集中于生态水源涵养^[11-12]、土壤分析特征与水分入渗、森林植被及其物理化学性质^[13-14]、土壤肥力^[15]、土壤水分与抗旱研究^[16-17]。以上研究大多数关注的是各类植被与林树上线有关的研究。

因此,阐明林树下线的控制土壤水分含量、时空分布特征及其作用机理,有利于揭示岷江上游退耕还林工程主要实施区的林树下线与山地环境之间的演化规律,可为评估生态环境建设的贡献提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于岷江上游杂谷脑河流域(31°11'52"—

31°55'7"N,102°35'36"—103°6'11"E),是岷江水系的一级支流,该区域属于典型的中高山峡谷地貌,具有寒冷干燥、降水稀少、日照充足和晴朗多大风等山地季风气候的特点^[18]。岷江上游杂谷脑河流域从河谷到高山植被依次主要有小叶灌丛、山地针叶林、中山暗针叶林、高中山灌丛草甸和高山寒漠。杂谷脑河流域土壤在海拔1 419~4 400 m分布有灰褐土、褐色土、暗棕壤、灰化土、高山草甸土、高山寒漠土,呈明显的垂直地带性分布特征。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 根据前期研究和实地调研发现,理县三寨村木卡乡高山林地林树下线分布于海拔2 250~2 300 m,为了鉴别林树下线的控制土壤水分含量,选择理县三寨村木卡乡高山林地林树下线及其交错带,采集土壤样品,在林树下线向下延伸一定干旱河谷灌丛区域(100 m),按照一定海拔梯度和坡面深度采集土壤样品,测定土壤水分含量、孔隙结构和持水量、土壤物化性质及养分含量。通过遥感解译发现,理县三寨村木卡乡林树下线在海拔2 250 m以上,选择海拔2 150~2 250 m灌丛作为林树下线生态交错带,2 250~2 400 m植被为原始森林。依据海拔每50 m变化,采用蛇形布点法均按照土壤剖面垂直纵深布点采样,取样深度为75 cm,分5个层次,各个层次分别为0—15 cm,15—30 cm,30—45 cm,45—60 cm,60—75 cm,所有采样均设置3个重复进行混合,用于测定土壤物理指标。通过测定植被高度、覆盖度、种类等指标,表明林树下线及其生态交错带土壤水分含量、土壤物理性质及植被之间的关系。采样时间为2022年9月,样地详细情况见表1。

1.2.2 测定方法 本研究主要测定对土壤持水特性有较大影响的土壤物理性质,包括含水率、土壤容重、孔隙度及颗粒组成。这些物理性质的测定参照《土壤农业化学分析方法》^[19],土壤含水率采用烘干法测量,土壤容重和孔隙度采用环刀法测量,土壤颗粒组成采用贝克曼库尔激光粒度仪进行测定。采用生态学基本调查方法,对所确定的样地内乔、灌、草本植物种类,数量,生长情况(自然高度、生长量)等指标进行调查,抽样调查时保证每个小样方中目标植被的数量在5株以上。

表 1 样地基本情况
Table 1 Basic information of sample plots

海拔高度/m	植被类型	植被概况
2150~2200	灌丛、荒草地	主要为铁杆蒿、刺旋花、马鞍羊蹄甲、白刺花、茅叶荩草、异颖芨芨草等灌木 3 类,草本 6 类,灌丛平均高度 0.98 m,草本类平均高度 0.27 m,灌丛盖度 5%,草本盖度 95%
2200~2250	灌丛、荒草地	主要为铁杆蒿、刺旋花、马鞍羊蹄甲、白刺花、茅叶荩草、异颖芨芨草等灌木 5 类,草本 4 类,灌丛平均高度 1.56 m,草本类平均高度 0.35 m,灌丛盖度 12%,草本盖度 88%
2250~2300	云杉人工林	主要为云杉,云杉树龄 30 a,平均树高 9.5 m,林下植被状况(灌木占 18.7%,草本占 67.5%)
2300~2350	云杉人工林	主要为云杉,云杉树龄 30 a,平均树高 11.3 m,林下植被状况(灌木占 18.7%,草本占 76.4%)
2350~2400	云杉人工林	主要为云杉,云杉树龄 30 a,平均树高 12.3 m,林下植被状况(灌木占 15.3%,草本占 81.6%)

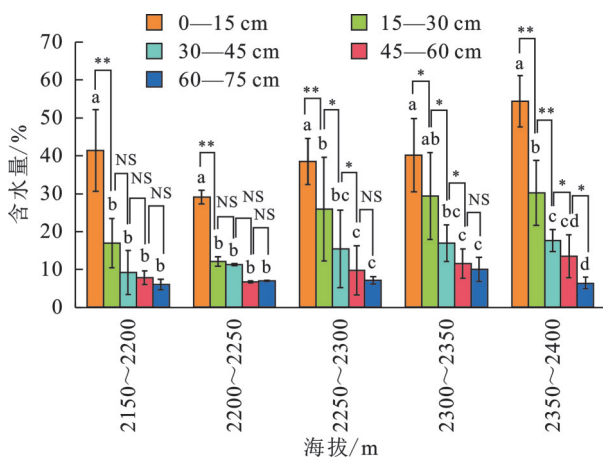
1.3 数据分析

采用 SPSS 21 对数据进行整理分析,利用独立样本 t 检验分析林树下线及其生态交错带土壤水分及其物理性质之间的差异显著性 ($\alpha=0.05$), 利用 Origin 2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 林树下线及其生态交错带土壤水分含量特征

通过测定理县三寨村木卡乡高山林地林树下线 2 250~2 400 m 海拔范围内 3 个不同海拔梯度(2 250~2 300 m, 2 300~2 350 m, 2 350~2 400 m)以及林树下线缓冲带 2 150~2 250 m 海拔范围内 2 个不同海拔梯度(2 150~2 200 m, 2 200~2 250 m)不同剖面深度土壤水分,分析林树下线的控制土壤水分含量(图 1)。



注:不同小写字表示组间差异显著性;NS表示 $p>0.05$; *表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$,下同。

图 1 不同海拔林树下线及其缓冲带不同深度土壤剖面水分含量

Fig. 1 Soil profile moisture content at different depths in lower timberline and its buffer zones across different elevations

由图看出,林树下线及其生态交错带不同深度土壤水分含量随土层深度的增加而显著递减,森林土壤水分含量大于灌丛土壤水分含量。表层土壤水分含量远远大于深层土壤水分含量,土层深度 0—15 cm 和 15—30 cm 土壤水分含量差异显著 ($p<0.01$), 0—15 cm 土

壤含水率高于 15—30 cm 土壤 12%~55%; 土层深度 30—75 cm 土壤水分含量差异性不显著 ($p>0.05$), 土壤含水率变化差异介于 6%~18%, 土壤水分的时间变化受植被覆盖的影响, 研究结果与马婧怡^[20]、Huang^[21]、刘萌^[22]等研究结论一致, 表层土壤容重小于深层土壤, 土壤孔隙有利于水分入渗, 导致表层土壤干湿变化剧烈, 林树下线生态交错带主要植被为灌丛和荒草, 根系发达, 相对于深层更有利于水分贮存; 林树下线区域由于植被生长茂盛, 地表植物种类丰富, 可以降低水分蒸发, 但是深层土壤由于植被根系的耗水作用, 导致下层土壤水分消耗快速, 表层土壤水分与底层差异较大。

在林树下线生态交错带, 随着海拔高度的升高, 土壤水分含量降低, 原因在于海拔 2 200~2 250 m 范围主要生长灌丛, 干旱河谷地带土壤结构破碎, 表层粗粒石较多, 蓄水保水能力差, 再加之壤中流和地表径流受重力作用的影响, 不断向坡脚汇集, 使土壤中的水分随海拔的降低而呈增加的趋势, 与严代碧^[23]、岳永杰^[24]等关于岷江上游干旱河谷区土壤水分含量随海拔变化趋势一致。林树下线 2 250~2 400 m 海拔高度范围内, 各土层深度土壤含水率均呈现随着海拔高度增加^[25], 含水率逐渐升高的趋势。分析原因在于林树下线植被覆盖率高, 林下枯落物丰厚, 拦蓄能力强, 但入渗能力慢, 加之植被根系深且密, 深层土壤水分损失快^[26]。

从林树下线及生态交错带整个土壤剖面的平均含水率来看, 林树下线土壤水分范围在 18%~24%, 林树下线生态交错带灌丛生长的土壤水分含量范围在 14%~16%, 林树下线分布走势主要受土壤水分的制约, 要保证树木生长存活, 土壤含水率需保持在不低于 18% 的水平, 要进行植树造林和植被修复, 应当自上而下进行。

2.2 林树下线及其生态交错带土壤物理性质分析

为了明晰土壤水分分布的影响因素, 分别测定了林树下线及其缓冲带土壤剖面的容重、机械组成、孔隙度及持水性特征。

2.2.1 孔隙度及持水性特征 土壤孔隙度说明了土壤孔隙的多少, 可以反映土壤浸水和通气状况, 土壤

持水量能反映土壤抗水抗蚀能力,是衡量土壤生态功能的重要指标^[27-29]。林树下线及其缓冲带不同海拔高度、不同深度土壤孔隙度及持水性状况见表 2。林树下线生态交错带总毛管孔隙度随海拔升高而增大,毛管孔隙度与总毛管孔隙度变化趋势一致,但非毛管孔隙度则呈现相反趋势。在各个海拔梯度上,随着土层深度的增加,总毛管孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均呈逐渐降低的趋势,表层土高于深层土,差异显著($p < 0.05$)。土壤的最大持水量、毛管持水量、最小持水量、排水能力和贮水量均随海拔梯度升高而增大,但随着土层深度的增加而降低,表层土壤与深层土壤差异性显著($p < 0.05$)。

林树下线土壤总毛管孔隙度随海拔升高而先增

大后减小,毛管孔隙度与总毛管孔隙度变化趋势一致,非毛管孔隙度则随着海拔升高而增大。在各个海拔梯度上,随着土层深度的增加,总毛管孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均呈逐渐降低的趋势,表层土高于深层土,差异显著($p < 0.05$)。土壤的最大持水量、毛管持水量、最小持水量、排水能力和壤贮水量均随海拔梯度升高而增大,但随着土层深度的增加而降低,表层土壤与深层土壤差异性显著($p < 0.05$)。

通过对比可发现,林树下线土壤总毛管孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度略高于生态交错带,差异不显著($p > 0.05$),说明林树下线土壤孔隙状况较好,土壤疏松,通透性较好,为植被的生长发育提供了较好的条件。

表 2 林树下线及其缓冲带不同海拔高度、不同深度土壤孔隙度及持水性状况

Table 2 Soil porosity and water-holding capacity at different altitudes and depths in lower timberline and its buffer zones

海拔/m	土层深度/cm	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	总毛管孔隙度/%	非比总/%	最大持水量	毛管持水量	最小持水量	排水能力	土壤贮水量
2150~2200	0-15	7.60±2.11a	59.03±1.97a	66.63±1.50a	11.41±0.78b	80.49±3.45a	75.54±2.78a	73.17±3.25a	14.93±0.19ab	65.65±3.05a
	15-30	4.40±0.63c	48.43±1.93b	52.83±2.25ab	8.33±0.23c	36.90±1.44b	31.48±1.13ab	29.17±3.25b	16.13±2.13a	49.56±2.26b
	30-45	6.30±1.09b	40.45±0.58b	46.75±1.27b	13.48±1.11a	31.88±1.28b	28.05±1.54c	26.26±0.26b	11.92±0.72c	38.83±0.42c
	45-60	4.20±1.78c	42.93±1.97b	47.13±2.44b	8.91±0.36c	35.76±1.09b	32.43±0.04b	30.83±0.98b	10.35±0.61c	28.82±1.36d
	60-75	2.70±1.15d	40.27±1.20b	42.97±1.25b	6.28±0.33d	34.55±0.08b	29.94±0.05c	29.25±1.00b	9.45±0.40d	11.39±0.37e
2200~2250	0-15	5.20±0.77a	57.26±3.14a	62.46±3.78a	8.33±0.76a	54.98±3.01a	50.62±1.70a	49.39±0.94a	9.60±2.64ab	68.79±3.82a
	15-30	2.00±0.54c	55.01±1.62a	57.01±1.93ab	3.51±1.44c	40.53±2.98bc	38.29±0.57c	36.13±0.15b	8.70±2.14b	56.93±1.35b
	30-45	5.10±0.52a	54.01±0.73a	59.11±1.08ab	8.63±2.04a	31.45±1.78c	28.94±0.49d	27.58±1.74c	8.00±0.76d	36.26±0.64c
	45-60	3.40±0.40b	49.39±2.57b	52.79±2.70b	6.44±0.99b	46.39±2.56b	42.92±0.19b	41.14±2.09ab	9.50±0.87c	20.48±5.23d
	60-75	3.40±0.55b	47.07±3.11b	50.47±3.49b	6.74±0.87b	41.32±3.12bc	37.49±0.03c	35.87±0.94b	10.60±1.20bc	19.63±2.33e
2250~2300	0-15	6.90±2.17a	50.40±3.53a	57.30±6.23a	12.04±1.46a	53.53±1.37a	55.20±1.66a	53.29±3.18a	13.20±0.31a	53.62±4.90a
	15-30	5.40±1.40b	45.26±6.83bc	49.73±3.56b	10.86±0.12b	39.85±2.22c	35.58±3.43b	34.34±1.92bc	11.40±1.84b	43.47±1.88b
	30-45	3.70±0.71d	48.64±5.23b	52.34±5.48ab	7.07±0.49d	41.84±1.11b	38.91±2.03b	36.46±1.04b	9.90±0.37b	28.64±0.19c
	45-60	4.30±0.77c	48.39±5.94b	52.69±5.44ab	8.16±0.37c	41.00±0.98b	37.69±0.93b	35.87±1.46b	9.97±0.08b	18.44±0.32d
	60-75	3.95±1.33d	48.40±2.54b	52.35±3.22ab	7.55±2.05d	42.66±0.78b	39.46±0.78b	36.12±1.68b	11.22±1.08a	12.12±1.11de
2300~2350	0-15	5.00±0.22a	57.79±1.87a	62.79±1.30a	7.96±1.02b	62.01±3.11a	56.88±2.75a	55.48±0.557a	9.90±0.55a	33.99±2.55a
	15-30	2.93±0.47d	49.69±2.11b	52.62±1.11bc	5.57±1.32c	59.00±1.33b	56.95±1.93a	56.12±2.86a	4.20±0.39d	17.41±0.49b
	30-45	3.47±0.78c	40.51±1.04bc	43.97±2.10c	7.89±0.17b	56.30±2.11b	51.41±1.72a	49.99±1.47b	9.90±2.04a	17.56±1.66b
	45-60	4.20±0.69b	51.32±1.25ab	55.52±2.47b	7.56±1.20b	40.92±5.44c	38.28±0.82b	36.57±0.30c	8.40±0.78b	12.88±1.43c
	60-75	4.93±0.71b	47.62±1.11b	52.55±1.33bc	9.38±0.53a	38.90±1.08d	36.28±1.03b	35.51±1.67c	6.60±0.89c	13.60±2.45c
2350~2400	0-15	7.80±0.09a	59.17±3.65a	66.97±3.45a	11.65±0.31c	63.75±1.25a	56.33±2.13a	52.11±3.45a	18.00±2.33a	64.84±3.41a
	15-30	7.65±0.08a	40.99±2.34b	48.64±2.88b	15.73±1.84a	40.45±3.14b	37.22±0.43b	35.30±1.86b	10.50±0.23c	34.09±2.12b
	30-45	5.50±0.03c	40.29±3.13b	45.79±1.89bc	12.01±1.22bc	33.68±3.53c	29.21±0.52c	28.14±1.55c	11.70±1.55c	19.57±1.20c
	45-60	4.65±0.06d	44.96±1.98b	49.61±2.11b	9.37±0.88d	34.83±1.11c	31.76±1.33bc	28.39±1.77c	13.05±1.45b	15.80±1.84d
	60-75	6.10±0.08b	41.41±2.01b	47.51±1.44b	12.84±1.65b	27.64±1.25d	25.90±0.61d	24.61±1.77cd	6.65±0.04d	13.35±1.77e

注:表中的小写字母代表 0.05 水平的差异显著性。下表同。

2.2.2 土壤机械组成 从林树下线及其缓冲带不同海拔高度、不同深度土壤机械组成状况(表 3)可见,在林树下线生态交错带各层土壤黏粒含量呈现随着土层深度的加深、海拔高度的提升而增大的趋势,含量在 7%~12% 范围内;砂粒含量随海拔的升高而增加,分别由 36.18% 上升到 42.42%,粉粒含量呈减小趋势,由 55.14% 下降到 48.14%。林树下线土壤砂粒和

粉粒含量随海拔的升高呈波动的变化趋势,含量分别介于 33%~43% 和 51%~56%,黏粒含量随海拔升高变化差异不显著($p > 0.05$)。林树下线生态交错带土壤砂粒含量高于林树下线区土壤砂粒含量,黏粒含量高于林树下线区土壤黏粒含量,粉粒含量高于林树下线区土壤粉粒含量,这表明植被恢复对土壤具有明显改善的作用,土壤机械组成比例趋向优化,土壤结构得到改善。

表 3 林树下线及其缓冲带不同海拔高度、不同深度土壤机械组成状况

Table 3 Soil mechanical composition at different altitudes and depths in lower timberline and its buffer zones

海拔/m	土层深度/cm	砂粒	粉粒	黏粒
2150~2200	0—15	38.77±3.25b	52.90±1.33a	7.41±0.11b
	15—30	40.90±3.05a	50.96±2.21a	8.14±0.34ab
	30—45	34.25±0.26b	56.38±0.75a	9.01±0.51a
	45—60	32.85±0.03b	57.66±1.10a	9.49±0.65a
	60—75	33.2±1.72b	57.79±0.04a	9.37±0.44a
2200~2250	0—15	36.00±0.06c	53.00±0.45b	7.32±0.24c
	15—30	45.35±0.15b	45.84±0.31bc	7.95±0.33c
	30—45	47.85±0.21b	44.21±0.24bc	8.82±0.10b
	45—60	25.80±0.21d	62.10±1.23a	12.10±0.78a
	60—75	57.10±0.03a	35.58±0.06c	11.00±0.65ab
2250~2300	0—15	31.48±1.66ab	58.10±1.82a	10.43±0.45ab
	15—30	34.55±0.08ab	54.41±0.76ab	11.05±0.78a
	30—45	39.18±1.21a	50.92±2.01b	9.91±0.22b
	45—60	38.55±1.34a	51.96±1.03b	9.49±0.18b
	60—75	37.05±2.01a	52.47±0.46b	10.48±0.66ab
2300~2350	0—15	31.17±2.12bc	57.43±2.03b	11.40±0.75a
	15—30	30.60±1.13bc	57.57±1.45b	11.83±0.87a
	30—45	29.67±2.45c	58.87±0.09a	11.46±1.17a
	45—60	34.53±1.82b	55.87±0.36bc	9.60±2.01b
	60—75	43.30±3.63a	48.67±1.01c	8.03±0.74bc
2350~2400	0—15	37.15±1.54ab	53.35±2.09a	9.50±0.08ab
	15—30	36.03±0.07ab	53.84±3.18a	10.13±1.21a
	30—45	39.53±2.14a	50.84±0.98a	9.64±0.06ab
	45—60	41.50±3.33a	49.10±1.54ab	9.40±0.04b
	60—75	38.88±0.08a	51.55±1.74a	9.58±0.08ab

2.2.3 土壤容重 林树下线及其缓冲带不同海拔高度、不同深度土壤容重分异特征见图 2。林树下线及其生态交错带表层土壤容重均低于深层土壤容重;在整个剖面上随着海拔升高呈现先减后增的趋势,最低值出现在海拔 2 220~2 250 m。在各个海拔高度上,土壤容重均随着深度的加深而逐渐变大。林树下线生态交错带土壤容重略小于林树下线土壤容重。原因在于:林树下线区域由于退耕还林多年,乔木、灌丛和草本生长旺盛,丰富的凋落物和能够有效促进土壤大孔隙的形成,降低土壤容重,增强土壤透水能力。

2.3 土壤水分对林树下线下移的响应

林树下线是岷江上游干旱河谷生态恢复的重要指示带,林树下线生态交错带是干旱河谷植被恢复的重要地域,通过分析林树下线土壤水分、土壤物理性质、植被多样性特征,阐明林树下线的控制土壤水分含量。

从林树下线及其生态交错带土壤水分与土壤性质之间的关系(图 3)中可以看出:土壤水分与持水量和孔隙度呈极显著正相关,持水量均与毛管孔隙度和总毛管孔隙度呈极显著正相关;砂粒与粉粒和黏粒呈

极显著负相关,粉粒和黏粒极显著正相关,且均与土壤水分、持水量、毛管孔隙度和总毛管孔隙度呈负相关,研究结果与阮长明等^[30]研究成果一致。

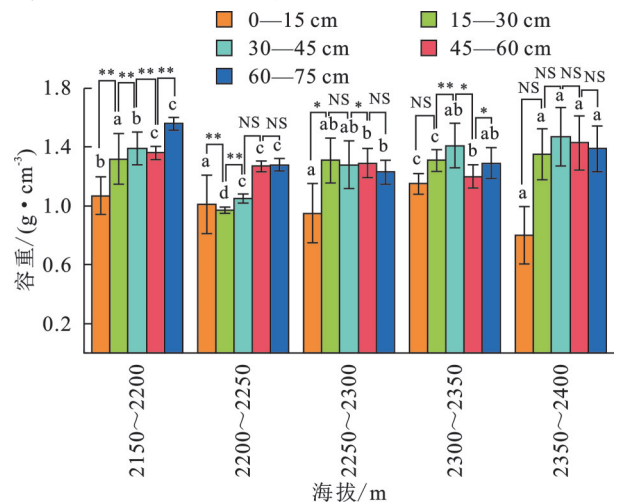


图 2 林树下线及其缓冲带不同海拔高度、不同深度土壤容重分异特征

Fig. 2 Variation characteristics of soil bulk density at different altitudes and depths in lower timberline and its buffer zones

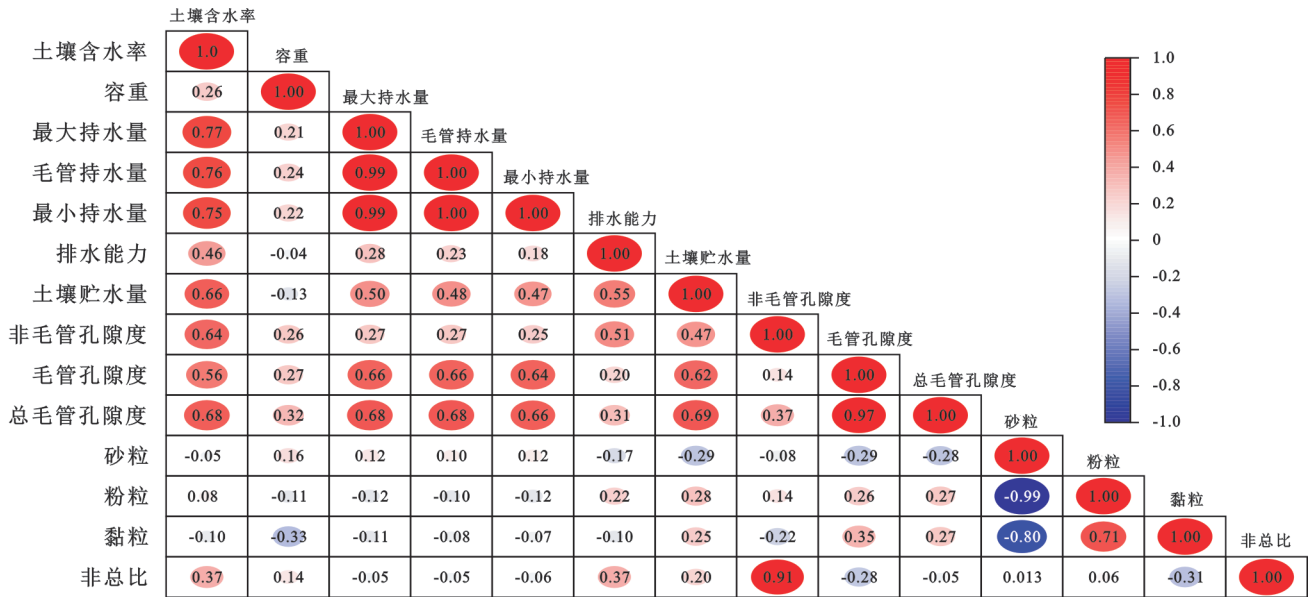


图 3 林树下线及其生态交错带土壤水分与土壤性质的相关性

Fig. 3 Correlation between soil moisture and soil properties in lower timberline and its ecotone

通过林树下线影响土壤水分分异主成分分析发现,海拔在 2 150~2 200 m 范围内的林树下线生态交错带影响土壤含水率的主要因素有毛管持水量、最小持水量、最大持水量、非毛管孔隙度和草本种类。海拔在 2 200~2 250 m 范围内的林树下线生态交错带土壤总毛管孔隙度、毛管孔隙度、黏粒、粉粒、容重和灌木种类与土壤含水率显著相关(图 4A)。通过林树下线生态交错带影响土壤水分分异主成分分析发现,影响 2 250~2 350 m 海拔范围内土壤水分的主要因素

为总毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、最小持水量和毛管孔隙度,次要因素为黏粒、灌木覆盖度和草本种类;在高海拔地区,影响土壤水分的主要因素为总毛管孔隙度、毛管孔隙度和容重(图 4B)。

由此可见,土壤水分与土壤性质之间相互作用、相互影响,土壤水分状况是岷江上游干旱河谷植被恢复的主要限制因子之一,土壤水分决定了植被类型的更替,同时植被反过来影响着土壤的孔隙状况、容重和持水性能,最终改善土壤水分状况。

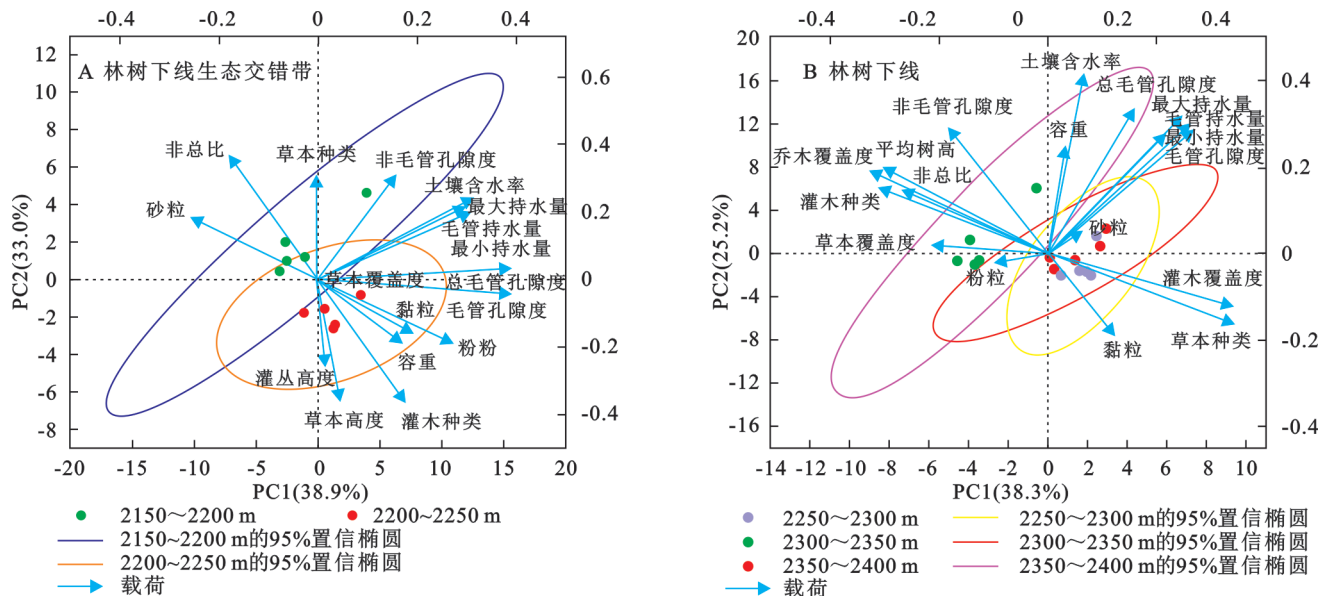


图 4 林树下线及其生态交错带影响土壤水分分异主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of factors influencing soil moisture variation in lower timberline and its ecotone

3 结论

(1) 林树下线及其生态交错带不同深度土壤水分含量随土层深度的增加而显著递减,森林土壤水分含

量大于灌丛土壤水分含量。林树下线及生态交错带土壤水分范围分别在 18%~24% 和 14%~16%,要进行植被恢复,需将土壤水分保持在 18% 以上。

(2) 林树下线生态交错带总毛管孔隙度和毛管

孔隙度随海拔升高而增大,非毛管孔隙度随海拔升高而减小,林树下线区域呈现相反的变化趋势。林树下线及其生态交错带在各个海拔梯度上,孔隙度表层土大于深层土,差异显著($p < 0.05$)。土壤持水性能均随海拔梯度升高而增大,但随着土层深度的增加而降低。

(3) 从林树下线及其生态交错带土壤水分与物化性质相关性、主成分分析结果可见,土壤水分与总毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、最小持水量、毛管孔隙度和植被类型呈显著相关关系,是影响土壤水分的主要因素。

(4) 土壤水分决定了植被类型的更替,同时植被影响着土壤的孔隙状况、容重和持水性能,最终改善土壤水分状况。因此,在当地进行植被恢复过程中,考虑到土壤水分问题,应当从高海拔向河谷生态交错带逐步向下进行,起到林树下线下移和抑制干旱河谷上延的作用,同时,还应利用立地条件、造林类型的优势,分别对植被进行恢复,最终达到岷江上游干旱河谷困难地段的植被恢复可以顺利进行的目的。

参考文献 (References):

- [1] 唐香君. 岷江上游杂谷脑河流域林树下线土壤水分研究[D]. 四川绵阳:西南科技大学,2014.
Tang X J. The Research of lower timber line and soil moisture in Zagunao River Basin of the upper reaches of Min River[D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2014.
- [2] Sveinbjörnsson B. North American and European treelines: external forces and internal processes controlling position[J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2000,29(7):388.
- [3] 翟真,王青. 岷江上游林树下线地理分布格局及其空间移动特征[J]. *地理研究*,2015,34(11):2105-2112.
Zhai Z, Wang Q. The geography distribution pattern and spatial move of the lower timberline in the upper reaches of Minjiang River[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(11):2105-2112.
- [4] 王青,郭亚琳,翟真. 岷江上游林树下线地理分布及实地调查样本点数据集(1999—2009)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*,2017,1(4):437-441,437-441.
Wang Q, Guo Y L, Zhai Z et al. The lower timberline dataset in the upper reaches of the Min River, China (1999—2009)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2017,1(4):437-441,437-441.
- [5] 方露,李晓宁,唐香君,等. 岷江上游杂谷脑河流域林树下线土壤持水性及影响因素[J]. *水土保持研究*,2018,25(5):95-102.
Fang L, Li X N, Tang X J, et al. Research on Water-holding Capacity and Related Factors in Zagunao River Basin in the Upper Reaches of Min River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(5):95-102.
- [6] Liu B X, Shao M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,517:974-984.
- [7] 庄季屏. 四十年来的中国土壤水分研究[J]. *土壤学报*, 1989,26(3):241-248.
Zhuang J P. Progress in research on soil water in people's republic of China in past 40 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989,26(3):241-248.
- [8] 熊亚兰,魏朝富. 西南丘陵区坡地土壤水分的时空变异[J]. *土壤通报*,2006,37(1):22-26.
Xiong Y L, Wei C F. Spatio-temporal variability of soil water content in sloping field of the southwest upland [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006,37(1):22-26.
- [9] 郭宝宝. 不同人为干扰程度对森林土壤水分物理性质的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*,2014,9(2):70-74.
Guo B B. Effects of different human interference on forest soil water-physical properties [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014,9(2):70-74.
- [10] 张爱军,岳艳杰,田龙,等. 冀北山地森林土壤水分物理性质和入渗规律研究[J]. *河北林果研究*,2015,30(2):108-112.
Zhang A J, Yue Y J, Tian L, et al. Study on water physical properties and infiltration law of forest soil in northern mountain of Hebei [J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2015,30(2):108-112.
- [11] 雷俊杰. 川西高原植被生态水遥感反演关键技术研究[D]. 成都:成都理工大学,2021.
Lei J J. Research on key technologies of remote sensing retrieval for vegetation ecological water in the Western Sichuan Plateau [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.2021.
- [12] 黄瑾. 岷江上游生态水遥感定量反演及径流预测模型研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.
Huang J. Research on remote sensing quantitative retrieved eco-water driven runoff forecasting model for the upper reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.2016
- [13] 蒲焱,左建梅. 岷江上游不同植被类型的土壤水分和物理性质[J]. *四川林业科技*,2019,40(3):37-41.
Pu Y, Zuo J M. Soil water-physical properties of different vegetation types in the upstream areas of the Minjiang River [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2019,40(3):37-41.
- [14] 闫婵娟,王青,刘传秀. 岷江上游杂谷脑河流域河谷断面的土壤孔隙与贮水特征[J]. *广东农业科学*,2018,45(4):106-113.
Yan C J, Wang Q, Liu C X. Characteristics of soil porosity and water storage in valley section of Zagunao

- River basin in the upper reaches of Min River [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45 (4): 106-113.
- [15] 伏耀龙. 岷江上游干旱河谷区土壤质量评价及侵蚀特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Fu Y L. Study on soil quality evaluation and erosion characteristics in arid valley area of upper reaches of Minjiang River [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2012.
- [16] 周会敏. 岷江上游干旱河谷优势灌木矿质元素与抗旱性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.
Zhou H M. Study on drought resistance of dominant shrubs and mineral elements of dominant shrubs in arid valley of the Minjiang River [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2019.
- [17] 申学圣, 宫渊波, 陈林武, 等. 岷江上游干旱河谷4个乡土树种的抗旱生理指标主成分分析[J]. *贵州林业科技*, 2012, 40(4): 1-6.
Shen X S, Gong Y B, Chen L W, et al. Principal component analysis on drought-resistance of 4 native tree species in arid valleys of the Minjiang River [J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2012, 40(4): 1-6.
- [18] 唐香君, 郭亚琳, 樊敏, 等. 岷江上游干旱河谷区林-农-草地土壤水分特征与数值模拟[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(7): 128-133.
Tang X J, Guo Y L, Fan M, et al. Moisture characteristics and numerical simulation of forest-farmland-grassland soil in arid valley region in the upper reaches of Min River [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(7): 128-133.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
Lu R K. Methods of soil agrochemical analysis [M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3471-3481.
Ma J Y, Jia N F, Cheng M. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3471-3481.
- [21] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199: 102962.
- [22] 刘萌. 祁连山半干旱区不同土地利用方式下土壤理化特性及草地生产力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
Liu M. Soil physicochemical characteristics and grassland productivity under different landutilization types in the semi-arid area of Qilian Mountains [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022
- [23] 严代碧, 岳永杰, 郑绍伟, 等. 岷江上游干旱河谷区土壤水分含量及其动态[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(4): 64-68.
Yan D B, Yue Y J, Zheng S W, et al. Soil water content and its dynamics in arid river valley region in upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2006, 30(4): 64-68.
- [24] 岳永杰, 慕长龙, 刘兴良, 等. 岷江上游干旱河谷区坡面尺度土壤贮水特性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(10): 162-166.
Yue Y J, Mu C L, Liu X L, et al. Study on soil water content characteristics at typical southern slope in arid river valley region, upstream of Minjiang River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(10): 162-166.
- [25] Sun F X, Lü Y H, Wang J L, et al. Soil moisture dynamics of typical ecosystems in response to precipitation: a monitoring-based analysis of hydrological service in the Qilian Mountains [J]. *Catena*, 2015, 129: 63-75.
- [26] 刘兴良, 慕长龙, 向成华, 等. 四川西部干旱河谷自然特征及植被恢复与重建途径[J]. *四川林业科技*, 2001, 22(2): 10-17.
Liu X L, Mu C L, Xiang C H, et al. Natural features of arid river valleys in western Sichuan and their vegetation restoring and reestablishing ways [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2001, 22(2): 10-17.
- [27] 李银, 杨洁, 李岩. 天津市不同功能区土壤物理特性研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(4): 331-336, 344.
Li Y, Yang J, Li Y. Physical properties of soil from different functional areas in Tianjin City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(4): 331-336, 344.
- [28] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 133-138.
Wu J Q, Ma W W, Li G, et al. Effects of four vegetation types on soil physical characteristics and permeability in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 133-138.
- [29] Tian J, Zhang B Q, He C S, et al. Dynamic response patterns of profile soil moisture wetting events under different land covers in the Mountainous area of the Heihe River Watershed, Northwest China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 271: 225-239.
- [30] 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(中英文)*, 2025, 23(1): 90-101.
Ruan C M, Ma S D, Wang B H, 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.