

CSF

团体标准

T/CSF XXXX-2026

西北土石山区流域

多功能森林植被配置技术规程

Technical specification for multifunctional configuration of
forest-vegetation in watersheds of rocky mountain areas
of Northwest China

2026-08-XX 发布

2026-08-XX 实施

中国林学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 原则 2

5 技术流程 2

6 流域立地区分类与多功能评价 2

7 坡面多功能森林植被合理结构确定 3

8 流域多功能森林植被优化配置 4

附录 A（资料性附录）六盘山半干旱区多功能立地类型划分及森林植被多种功能排序案例 5

附录 B（资料性附录）六盘山半干旱区华北落叶松林生长指标和多种功能变化规律案例 6

附录 C（资料性附录）六盘山半干旱区天然虎榛子灌丛生长指标和多种功能变化规律案例 12

附录 D（资料性附录）六盘山半干旱区天然草地生长指标和多种功能变化规律案例 14

附录 E（资料性附录）六盘山半干旱区典型坡面森林植被配置和多种功能变化案例 16

附录 F（资料性附录）六盘山半干旱区叠叠沟小流域多功能森林植被空间配置案例 20

参考文献 29

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第一部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国林学会提出并归口。

本文件起草单位：中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所、宁夏农林科学院林业与草地生态研究所、宁夏农林科学院固原分院、固原市原州区林业和草原局、固原市六盘山林业局、北京林业大学。

本文件主要起草人：于澎涛、王彦辉、韩新生、王蕾、余治家、王双贵、郑小义、李卓、董克库、胡永强、明小强、徐秀琴、樊亚鹏、韩宏、梁斌、者金付、李龙平、王正安、殷爱萍、袁彩霞、魏林兵、兰斓、李根银、李德斌、于梦芸、闫志军、余会军、徐宏福、邓树剑、苏亚文、马杰、王利霞、万艳芳、于艺鹏。

西北土石山区流域多功能森林植被配置技术规程

1 范围

本文件规定了多功能森林植被配置的原则、技术流程、流域立地分区分类与多功能评价、坡面多功能森林植被理想结构、流域多功能森林植被优化配置等技术。

本文件适用于在西北土石山区流域进行面向多功能利用的乔木林、灌丛、草地等植被的空间规划与经营管理，其它地区可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 15776	造林技术规程
GB/T 15781	森林抚育规程
GB/T 26424	森林资源规划设计调查技术规程
GB/T 38590	森林资源连续清查技术规程
LY/T 1897	华北落叶松人工林经营技术规程
DB 64/T 809	宁南山区多功能水源涵养林营造技术规范
T/CSF 004	西北地区土石山区华北落叶松人工林多功能经营技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本规程。

3.1

多功能森林植被管理 management of multifunctional forest-vegetation

多功能森林植被管理是指基于森林植被多种功能的提供潜力与社会需求的关系，合理调控各类森林植被的数量、结构与分布格局，从而协同发挥主导功能和其它功能，更好满足区域发展需求。

3.2

坡面 hillslope

坡面是构成山地、丘陵等地貌形态的基本空间单元，泛指从分水岭至谷底的整个斜坡地表，通常指坡度大于 2° 的地段。

3.3

水资源植被承载力 vegetation carrying capacity of water resources

水资源植被承载力是指在维持流域及植被系统健康并保障社会经济用水安全的前提下，有限水

资源所能支撑的最大植被规模及其结构与空间格局。

3.4

坡面多功能森林植被配置 **multifunctional forest-vegetation configuration on hillslopes**

为了实现多功能利用目标，在坡面的不同坡位立地上，进行森林植被结构的差异化配置。

3.5

流域多功能森林植被配置 **multifunctional forest-vegetation configuration in watersheds**

为了实现多功能利用目标，在流域不同坡面和立地上，优化配置森林植被的数量、结构和格局。

4 原则

4.1 整体多功能优化

明确立地（坡位）、坡面、流域三个空间尺度的多功能优化重点，确保各空间尺度的措施协调与目标协同，实现流域多种功能的整体优化。

4.2 多功能立地分类

在流域内按流域分区和立地类型，明确森林植被提供主导功能及其它功能的潜力，并考虑与社会经济发展的多种功能需求的关系，确定主导功能及其它功能的重要性排序和多功能管理方向。

4.3 以多功能森林植被合理结构为参照

按照流域内不同立地类型和森林植被发育阶段，确定能满足多功能管理要求的森林植被合理结构，并以此为参照，优化流域内森林植被的数量、结构（质量）与分布格局。

5 技术流程

技术流程见图1。

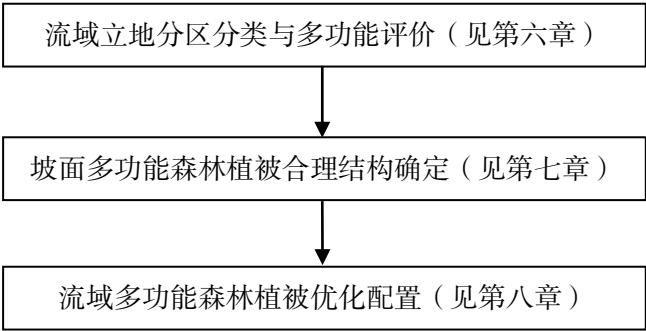


图 1 西北土石山区流域多功能森林植被配置技术流程

6 流域立地分区分类与多功能评价

6.1 流域立地分区分类

流域立地分区分类包括如下步骤：

- a) 综合考虑流域的自然环境（尤其气候和地貌）、植被资源、社会经济、治理需求等，按照科学实用原则，将流域划分为内部相似的一些空间单元，明确各自的森林植被主导功能和其它功能的重要性排序及多功能管理方向；但对内部差异不大的流域（小流域），可不再分区。
- b) 依据坡向划分坡面类型，如按向两侧偏离正北的角度分为阴坡（ $0\sim45^\circ$ ）、半阴坡（ $45\sim90^\circ$ ）、半阳坡（ $90\sim135^\circ$ ）、阳坡（ $135\sim180^\circ$ ），根据各坡面的立地环境和植被生长及多种功能供给潜力，确定森林植被主导功能和其它功能的重要性排序及多功能管理方向。
- c) 按照立地因子（海拔、坡向、坡位、土层厚度等）的组合划分一系列立地类型，可将条件相似或面积占比太小（如 $<0.5\%$ ）的合并，以便生产应用。对各类立地，除了确定可能生长的森林植被及结构特征外，还要依据各类立地的多种功能提供潜力及与社会发展需求的关系，明确主导功能和其它功能的重要性排序及多功能管理方向。

6.2 多功能评价

按如下步骤开展流域森林植被的多功能评价：

- a) 对流域各立地分区内各类典型坡面不同坡位代表的立地类型，定量评价森林植被的结构特征及其多种功能（产水、木材生产、土壤保持、固碳、植物多样性保护等）的物理量；
- b) 依据各坡面不同坡位的水平坡长，加权计算整个坡面的多种功能，并汇总得到各个分区和整个流域的多种功能；
- c) 进行流域森林植被的多功能综合评价，除了关注各功能大小外，要格外注意主导功能和其它功能的权衡关系，综合研判是否能实现面向社会经济发展需求的多种功能均衡供给。

7 坡面多功能森林植被合理结构确定

7.1 乔木林多功能合理密度确定

采用如下步骤，定量确定典型坡面不同坡位所在立地和不同林龄时的乔木林多功能合理密度：

- a) 建立或选择林分生长指标和功能指标随立地条件、林龄、密度等变化的模型；
- b) 基于上述模型，确定满足各相应功能要求的林分密度区间；
- c) 确定不同立地和林龄时的林分最大密度，以及满足合理郁闭度要求的林分基本密度区间；
- d) 基于 b) 和 c) 确定的林分密度区间，考虑林分最大密度的限制，应用加权平均法（按各功能重要性排序由大到小赋予权重）或交集法（按各功能重要性排序依次寻找交集），权衡确定满足多功能管理要求的林分密度区间。

7.2 灌丛多功能合理结构确定

采用如下步骤，定量确定典型坡面不同坡位所在立地的灌丛多功能合理结构：

- a) 建立或选择灌丛特征（植被覆盖度、平均高度、物种组成、叶面积指数等）和各功能指标随坡向、土层厚度等变化的模型；
- b) 基于上述模型，确定各相应功能要求的灌丛结构指标区间；

- c) 基于 b) 的结果, 应用加权平均法或交集法, 权衡确定灌丛多功能合理结构。

7.3 草地多功能合理结构确定

采用如下步骤, 定量确定典型坡面不同坡位所在立地的草地多功能合理结构:

- a) 建立或选择草地特征(植被覆盖度、平均高度、物种组成、叶面积指数等)和各功能指标随坡向、土层厚度等变化的模型;
- b) 基于上述模型, 确定各相应功能要求的草地结构指标区间;
- c) 依据 b) 的结果, 应用加权平均法或交集法, 权衡确定草地多功能合理结构。

8 流域多功能森林植被优化配置

8.1 立地多功能森林植被结构优化

立地尺度的多功能森林植被结构优化步骤如下:

- a) 明确给定坡面不同坡位所在的立地类型和立地质量;
- b) 明晰该立地类型的森林植被多种功能及其优先性排序;
- c) 调查现有森林植被的结构特征;
- d) 诊断现有森林植被的结构与功能(和多功能合理结构对比);
- e) 编制面向植被结构与多功能优化的管理方案。

8.2 坡面多功能森林植被优化配置

坡面尺度的多功能森林植被优化配置步骤如下:

- a) 依据给定坡面的长度、植被生长坡位差异等情况, 按坡位划分一定数量的立地类型, 并确定各坡位代表的水平坡长;
- b) 依据 8.1 的方法, 明确各坡位所在立地的多功能利用方向, 诊断现有森林植被与多功能合理结构的差别, 明确多功能管理和配置方向;
- c) 按多功能优化配置方向, 考虑各坡位所在立地可能生长的森林植被组合, 形成坡面森林植被配置的一系列情景;
- d) 利用相关模型, 模拟计算各坡位的多种功能, 并通过各坡位水平坡长的加权平均, 计算整个坡面多种功能的数值;
- e) 基于 d) 的计算结果, 从坡面整体多功能优化角度, 筛选确定各坡位的适宜森林植被类型和结构特征, 形成坡面尺度的森林植被多功能管理和优化配置方案。

8.3 流域多功能森林植被优化配置

流域尺度的多功能森林植被优化配置步骤如下:

- a) 根据流域的多种功能供给潜力和区域发展需求, 确定流域的主导功能和其它功能的重要性排序, 明确流域多功能管理要求。
- b) 查明当前流域内各类森林植被的数量、结构及分布格局, 对照坡面多功能森林植被配置模式和立地多功能森林植被合理结构, 评价现有森林植被偏离“理想”状态的程度和分布特征, 确定需解决的问题和流域多功能管理目标。
- c) 明确流域多功能管理的约束条件, 包括目标约束(如满足产水主导功能、不过分降低其它功能)、生态约束(如不突破允许土壤侵蚀量)、经营约束(如合理郁闭度范围和林木采伐强

- d) 度)、空间约束(如基本农田保护、各类立地的适宜植被类型)等;将流域多功能管理目标初步转化为森林植被的数量、结构、分布格局,尽量落实到各分区内不同坡面的各坡位地块。
- e) 建立并利用流域多种功能随森林植被的数量、结构、分布格局变化的模型(统计模型、生态水文模型等),设计多种可能的森林植被配置情景,模拟流域主导功能和其它功能的变化。
- f) 在上述情景模拟结果中优选最适宜的管理方案,并配齐落地实施的技术措施(如造林营林方式、规模、时间和地块),进行对应的多功能影响综合评估。在试点实施中监测关键指标,若效果有偏差就及时改进,如调整模型参数或决策过程,从而持续优化流域森林植被的数量、结构和分布格局,实现流域多功能的持续协同提升。

附录 A (资料性)

六盘山半干旱区多功能立地类型划分及森林植被多种功能重要性排序案例

森林植被的多功能管理就是合理调控相互竞争的多种功能，优先满足主导功能，并兼顾重要性逐次降低的其它功能。为使经营管理落实到地块，要划分多功能立地类型，依据各类立地的多种功能提供潜力及其与社会需求的关系，确定多种功能的重要性排序和适宜植被类型。

对自然条件差异明显的较大流域，需进行多功能分区；对自然条件差异不明显的小流域，可不再分区，直接应用海拔、坡向、坡位等立地因子划分立地类型。海拔影响垂直气候，可分出不同海拔段；但在六盘山叠叠沟小流域，海拔变化范围小（1975~2520 m），为简化立地分类，未予考虑。将坡向按向两侧偏离正北的角度分为阴坡（0~45°）、半阴坡（45~90°）、半阳坡（90~135°）、阳坡（135~180°），坡位分为上坡位、中坡位和下坡位（若需要可继续细分）。附表A是叠叠沟小流域依据坡向和坡位（也体现为土层厚度）划分的12个立地类型及其多种功能重要性排序，排位第一的是主导功能。在水分条件好、木材生产潜力高的立地，木材生产功能位置靠前；在土壤瘠薄、植被生长差、土壤侵蚀风险大的立地，土壤保持功能位置靠前；因地处水源区，其它立地均将产水作为主导功能。

表 A.1 宁夏六盘山半干旱区叠叠沟小流域立地类型及其森林植被多种功能的重要性排序

立地类型 编号	坡向	坡位	坡度范围 /°	土壤类型	土层厚度 范围 /cm	主要功能重要性排序	主要分布植被
1	阴坡	上	10~43	山地灰褐土	30~95	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳、木材生产	华北落叶松、虎榛子等
2	阴坡	中	11~39	山地灰褐土	65~165	产水、固碳、木材生产、土壤保持、物种多样性保护	华北落叶松、白桦等
3	阴坡	下	7~32	山地灰褐土	105~200	木材生产、产水、固碳、物种多样性保护、土壤保持	华北落叶松、白桦等
4	半阴坡	上	5~48	山地灰褐土	15~90	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳、木材生产	华北落叶松、虎榛子、沙棘、草地等
5	半阴坡	中	7~44	山地灰褐土	35~135	产水、土壤保持、固碳、木材生产、物种多样性保护	华北落叶松、白桦、沙棘、草地等
6	半阴坡	下	3~38	山地灰褐土	65~165	产水、固碳、木材生产、土壤保持、物种多样性保护	华北落叶松、白桦、草地等
7	半阳坡	上	1~42	亚高山草甸土	5~55	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	虎榛子、沙棘、山桃、草地等
8	半阳坡	中	15~44	山地灰褐土	15~75	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	沙棘、山桃、草地等
9	半阳坡	下	2~45	山地灰褐土	30~115	产水、固碳、物种多样性保护、土壤保持、木材生产	华北落叶松、沙棘、山桃、草地等
10	阳坡	上	1~42	亚高山草甸土	5~45	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	虎榛子、沙棘、山桃、草地等
11	阳坡	中	14~41	亚高山草甸土	15~85	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	沙棘、山桃、草地等
12	阳坡	下	12~33	山地灰褐土	35~105	产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	沙棘、山桃、草地等

附录 B

(资料性)

六盘山半干旱区华北落叶松林生长指标和多种功能变化规律案例

为在六盘山半干旱区进行华北落叶松人工林多功能管理的定量决策，需量化各功能随主要因子的变化规律，为此建立了预测林分生长指标和主要功能指标变化的模型，提供了多功能管理案例。

B.1 林分生长指标随主要因子变化的模型

叠叠沟小流域海拔变化范围小，因而在本附录立地分类和建立模型时没考虑。影响林分平均树高（ H , m）和平均胸径（ DBH , cm）生长的主要因子是林龄（ age , a）、密度（ den , 株/hm²）、坡向（ sa , °）、土层厚度（ sth , cm）。利用实测数据的散点图外包线，分析了各因子的非线性影响，表明随林龄增加，树高和胸径及郁闭度在20 a之前快速升高，之后升高渐缓；林冠层叶面积指数（ LAI ）先升后降，峰值在林龄27 a。随林分密度增加，树高和胸径先稳定，在分别达到2000、1500株/hm²后缓慢下降，在达到3000、2300株/hm²后降速加快；郁闭度先快速增加后缓慢增加，在超过1100株/hm²后趋于稳定；林冠层 LAI 先快速增加，后慢速增加，再趋于稳定，对应2个密度阈值为500和1400株/hm²。随坡向增加（从阴坡转向阳坡），树高、胸径、郁闭度、 LAI 均先表现为稳定，在坡向分别达到80、80、60、50°后迅速降低。随土层厚度增加，树高、胸径、郁闭度、林冠层 LAI 均先升高，在土厚分别达到90、80、80、100 cm后逐渐趋于稳定。基于因变量和各自变量实测数据散点图的外包线，确定了对各因子的非线性响应函数，然后连乘耦合得到多因子模型，并用实测数据拟合了模型参数。

反映林龄、密度、坡向、土层厚度影响的林分平均树高（式B.1）和平均胸径模型（式B.2）为：

$$H = 33 \times [1 - \exp(-0.0276 \times age^{1.41})] \times \exp(-4.24 \times 10^{-29} \times den^{7.72}) \times \exp(-1.13 \times 10^{-8} \times sa^{3.56}) \times [1 - \exp(-0.142 \times sth^{0.201})] \quad \dots(B.1)$$

$$R^2=0.80$$

$$DBH = 110 \times [1 - \exp(-0.0206 \times age^{1.38})] \times \exp(-0.00015 \times den^{0.969}) \times \exp(-5.93 \times 10^{-5} \times sa^{1.62}) \times [1 - \exp(-0.101 \times sth^{0.0969})] \quad \dots(B.2)$$

$$R^2=0.85$$

用综合反映多因子对林木生长影响的立地指数（ SI , m，基准年龄30 a的林分优势木平均高）替代多个立地因子，拟合了更简单的平均树高（式B.3）和胸径模型（式B.4），用于有立地指数基础时。

$$H = (1.6 \times SI^{0.685}) \times [1 - \exp(-0.00726 \times age^{1.87} \times den^{0.00559})]^{(-0.0362 \times SI + 1.25)} \quad \dots(B.3)$$

$$R^2=0.90$$

$$DBH = (33.9 \times SI^{-0.291}) \times [1 - \exp(-14.1 \times age^{0.0779} \times den^{-0.0162})]^{(-3.07 \times 10^5 \times SI + 7.99 \times 10^6)} \quad \dots(B.4)$$

$$R^2=0.80$$

由林分平均树高与胸径计算林分平均木的单株地上生物量 ($W_{\text{落-单株-地上}}$, kg/株, 式 B.5) 和地下 (根系) 生物量 ($W_{\text{落-单株-根}}$, kg/株, 式 B.6), 并依据林分密度计算林分地上生物量 ($W_{\text{落-林分-地上}}$, t/hm², 式 B.7) 和地下生物量 ($W_{\text{落-林分-根}}$, t/hm², 式 B.8)。

$$W_{\text{落-单株-地上}} = \exp[0.94 \times \ln(DBH^2 H^{0.509}) + 8.24] \quad \dots(B.5)$$

$$R^2=0.81$$

$$W_{\text{落-单株-根}} = \exp[1.39 \times \ln(DBH^{1.55}) + 6.4] \quad \dots(B.6)$$

$$R^2=0.80$$

$$W_{\text{落-林分-地上}} = \exp[0.943 \times \ln(DBH^2 H^{0.719}) + 1.42] \times den^{1.02} \quad \dots(B.7)$$

$$R^2=0.86$$

$$W_{\text{落-林分-根}} = \exp[1.37 \times \ln(DBH^{1.84}) - 0.82] \times den^{1.16} \quad \dots(B.8)$$

$$R^2=0.85$$

林冠郁闭度 (CD, 小数) 和林冠层生长季内最大叶面积指数 (LAI) 的多因子耦合模型为:

$$CD = [1 - \exp(-0.0151 \times den^{0.684})] \times [1 - \exp(-0.0446 \times age^{1.16})] \quad \dots(B.9)$$

$$\times \exp(-3.16 \times 10^{-10} \times sa^{4.36}) \times [1 - \exp(-0.0365 \times sth^{0.914})] \quad R^2=0.74$$

$$LAI = 5.5 \times [1 - \exp(-0.584 \times den^{0.26})] \times \left\{ \begin{array}{l} 1.1 \times [1 - \exp(-0.0756 \times age)]^{1.75} \\ -0.55 \times [1 - \exp(-0.0878 \times age)]^{17.1} \end{array} \right\} \quad \dots(B.10)$$

$$\times \exp(-5.22 \times 10^{-15} \times sa^{6.74}) \times [1 - \exp(-0.0529 \times sth^{0.769})] \quad R^2=0.72$$

B.2 主要功能的模型和管理

B.2.1 林地产水功能变化与管理

建立了半干旱区华北落叶松林生长季林分总蒸散 (ET_{sum} , mm) 组分模型 (式 B.11), 驱动因子有生长季年均降水量 (P_{sum} , mm)、潜在蒸散 (PET_{mean} , mm)、林冠叶面积指数 LAI_{mean} (与最大 LAI (LAI_{max}) 的关系为 $LAI_{\text{mean}} = 0.692 \times LAI_{\text{max}} + 0.0015$)、0~100 cm 土层体积含水量 (VSM_{mean} , cm³/cm³)。

$$ET_{\text{sum}} = 89.56 \times LAI_{\text{mean}} \times [1 - \exp(-0.007524 \times P_{\text{sum}})] \quad \dots(B.11)$$

$$+ 0.02206 \times P_{\text{sum}} \quad R^2=0.67$$

$$+ 300 \times (27.51 \times PET_{\text{mean}}^2 - 254.4 \times PET_{\text{mean}})$$

$$\times [1 - \exp(-0.1 \times VSM_{\text{mean}})]$$

$$\times [1 - \exp(-0.008339 \times LAI_{\text{mean}})] + 141.96$$

$$\times (51.626 \times PET_{\text{mean}} + 126.66)$$

$$\times [1 - \exp(-0.01791 \times VSM_{\text{mean}})] \times [\exp(-0.02083 \times LAI_{\text{mean}})]$$

$$+ 58.74$$

基于长期水量平衡原则, 忽略土壤储水变化, 计算生长季降水量和蒸散量的差, 作为林地产水

功能,其值随降水量增加而升高,随坡向增加(从阴坡转向阳坡)逐渐增大,随土层厚度增加逐渐减小,随林木密度增加先降低后稳定,随林龄增加先减后增。林地产水功能随 LAI 增加近线性减少,在枯水年当 LAI 超过某阈值后会因蒸散大于降水而为负值,即消耗土壤储水或坡上来水。要维持或增加产水主导功能,需适当降低林分密度及林冠 LAI,但要避免过分降低而过分丧失其它功能。

B.2.2 木材生产功能变化与管理

随林分密度增加,林分平均单株材积逐渐降低;林分蓄积先快速增加,后增加渐缓,但之后呈降低趋势。单株材积和林分蓄积随林龄和土层厚度增加逐渐增大,随坡向增加(从阴坡转向阳坡)逐渐减小。拟合了由林分平均树高(H , m)和平均胸径(DBH , cm)及密度(den , 株/hm²)计算林分平均单株材积($V_{单株}$, m³/株)的模型(式 B.12)及林分蓄积($V_{林分}$, m³/hm²)的模型(式 B.13):

$$V_{单株} = 15.8 \times DBH^{1.86} \times H^{1.03} \quad \dots(B.12)$$

$$R^2=0.83$$

$$V_{林分} = 17.5 \times DBH^{1.29} \times H^{1.63} \times den^{0.909} \quad \dots(B.13)$$

$$R^2=0.86$$

六盘山半干旱区华北落叶松林的数量成熟龄为 27 a,平均单株材积与林分蓄积在林龄 50 a 时仍快速增长,需延长过去提出的轮伐期(26 a),在适宜立地开展连续覆盖的、培育优质大径材目标树的近自然经营。根据单株材积及林分蓄积差异,划分了木材生产功能区等级:材积生产可达最大值 90%以上为最优区(坡向 < 59°, 土层厚度 > 152 cm);达最大值 70~90%为适宜区(坡向 59~98°, 土层厚度 80~152 cm);在最大值 70%以下为非适宜区(坡向 > 98°, 土层厚度 < 80 cm)。

B.2.3 林下植物多样性保护功能变化与管理

基于实测数据散点图上外包线,建立了林下植物种数(SN)响应生长季最大林冠 LAI 的关系式:

$$SN = 14.103 - 0.4279 \times LAI^3 + 1.0378 \times LAI^2 - 6.7071 \times LAI \quad \dots(B.14)$$

$$R^2=0.97$$

基于式 B.14 评价了林下植物种数对林冠结构的响应,即随 LAI 增加而先升后降,最大值出现在 LAI 为 3.23 时;要维持在最大值的 90%以上,需控制 LAI 在 2.14~4.18 之间。

灌木层覆盖度随林冠 LAI 增加也先升后降,最大值在 LAI 为 2.33 时;要维持在最大值 90%以上,需控制 LAI 在 1.48~3.19。草本层覆盖度随林冠 LAI 增加先稳定在最大值附近,当 LAI > 3.39 时开始降低,在 LAI 为 4.16 时缓慢降至最大值的 90%,之后快速降低。将林冠层 LAI 控制在 1.48~3.19,可保证林下灌木层和草本层的覆盖度均达其最大值的 90%以上。

林下灌草生物量随林冠层 LAI 增加在 LAI ≤ 1.31 时维持稳定,在 LAI 为 1.31~2.85 时缓慢降低,之后迅速下降。将 LAI 控制在 < 2.85 的范围,可维持林下植被生物量在最大值 90%以上。

对林下植物的种数、覆盖度及生物量分别赋予权重 0.63、0.26、0.11 时,三个林下植被特征的最优 LAI 加权平均值为 2.95,向两端各扩展 10%得到一个 LAI 范围(2.65~3.25)及对应林木密度范围,并与森林多功能管理要求的郁闭度范围(0.6~0.8)对应的林木密度范围对比,当二

者存在交集时取此交集，否则优先取满足郁闭度管理要求的林木密度范围，用于指导多功能森林经营。

B.2.4 森林固碳功能变化与管理

六盘山半干旱区华北落叶松林各组分碳库 (t/hm^2) 均值 (及占总碳库比例) 为乔木层 20.16 (6.83%)、林下植被层 2.23 (0.76%)、枯落物层 5.83 (1.98%)、根系层 (0~100 cm) 土壤 266.94 (90.44%)。乔木层碳密度随林龄和土层厚度增加逐渐升高；随坡向增加逐渐减小；随林木密度增加先迅速升高，后增速减缓，之后逐渐稳定。因造林扰动和暴露，造林初期上层土壤碳含量剧烈衰减，待郁闭后随凋落物归还量增加才缓慢恢复，因此拟合了 0~40 cm (SOC_{0-40}) 与 41~100 cm 土层有机碳密度 (SOC_{41-100}) 的比值 ($\frac{\text{SOC}_{0-40}}{\text{SOC}_{41-100}}$) 随乔木层生物量 ($W_{\text{落-样地}}$) 增加而先减后增并渐趋稳定的关系：

$$\frac{\text{SOC}_{0-40}}{\text{SOC}_{41-100}} = 0.0002116 \times W_{\text{落-样地}}^2 - 0.007918 \times W_{\text{落-样地}} + 1.188 \quad \dots(\text{B.15})$$

$R^2=0.79$

利用上式计算分析了密度 1000 株/ hm^2 及土层厚度 120 cm 时的土壤碳密度变化，表明皆伐造林后两个土层碳密度比值降至最低的林龄在坡向 30°、60°、90°、120°处分别为 17、17、19、21 a，恢复到造林前水平的林龄在坡向 30°、60°、90°处为 27、29、34 a，之后随林龄增加逐渐升高并渐趋稳定，但在坡向 120°处无法恢复到原水平。继续以密度 1000 株/ hm^2 及坡向 30°为例，在土层厚度为 40、80、120、160 cm 时，皆伐造林后两个土层碳密度比值降至最低的林龄为 20、18、17、16 a，恢复到造林前水平的林龄为 45、30、27、25 a，之后随林龄增加而逐渐升高并渐趋稳定。土壤碳密度随林分密度增加先微弱降低，后逐渐升高，再缓慢降低，随其它因子的变化趋势与乔木层碳密度相同。枯落物层及森林总碳密度随主要因子的变化趋势与乔木层碳密度基本一致。从维持和提高土壤碳库及森林整体固碳功能角度，应追求林地连续覆盖的经营，防止皆伐后造林和过度采伐等强烈干扰。

B.3 森林多功能管理权衡策略与典型案例

为进行森林多功能管理，需基于各单一功能的变化规律，按如下决策步骤，权衡确定不同立地和林龄时的多功能管理密度区间：

- 1) 对给定立地 (坡向 sa , °; 土层厚度 sth , cm)，计算不同林龄 (age , a) 时能承载的最大林分密度 ($Den_{\max}$, 株/ hm^2)，在叠叠沟小流域的模型为： $Den_{\max} = 146.8 \times \{[0.7975 - 0.1577 \times \ln(age)] \times (291 - 0.009426 \times sa^2 + 0.1225 \times sa) \times [0.059 \times \ln(sth) - 0.05782]\}$;
- 2) 计算满足林分稳定要求的郁闭度 0.6~0.8 对应的基本林木密度区间；
- 3) 计算各单一功能达到其最大值 90%以上时要求的最优密度区间；或不能满足时退而求其次，计算达到其最大值 80%以上时要求的适宜密度区间；
- 4) 按多种功能的重要性排序，逐一确定各单一功能的最优 (或适宜) 密度区间与最大密度和基本密度区间的交集，作为多功能管理的初步密度区间。在不存在交集的情况下，还可以依据各种功能的重要性排序，赋予逐次减小的权重 (如本案例叠叠沟小流域的各功能权重

- 5) 为主导功能 0.33、第二功能 0.28、第三功能 0.22、第四功能 0.17), 然后基于各功能最优密度区间的中间值与其权重加权平均, 得到最优密度, 并向两侧扩展 10%~20% (这里 15%), 作为多功能管理的初步密度区间, 并限制在最大密度和基本密度范围内;
- 6) 对上述多功能管理初步密度区间, 依据有关原则和技术规程适当调节, 如高龄林管理密度区间需小于或等于低龄林管理密度区间, 次间伐强度一般不超过 20%且两次间伐至少间隔 5 a (长期禁伐导致过密林的特殊情况可间隔 2~3 a), 确定间伐强度和间隔期还应综合考虑各地林木生长速度、经营成本和产出等因素, 从而得到合理可行的多功能管理密度区间。
- 利用此程序计算了叠叠沟小流域典型立地 (能生长林木但属木材生产非适宜区的阴坡上和中坡位、半阴坡、半阳坡下坡位, 属木材生产适宜区的阴坡下坡位) 的多功能管理密度区间 (表 B.1)。

表 B.1 六盘山半干旱区不同坡向、坡位和林龄时的华北落叶松林多功能管理密度区间

坡向	坡位	特征	多功能排序	典型林龄时的多功能管理密度 (株/hm ²)		
				20 年生	30 年生	40 年生
阴坡	上坡位	土层瘠薄, 不适宜生产木材	产水 > 物种多样性 > 固碳 > 木材生产	1250 ~ 1650	1000 ~ 1350	850 ~ 1200
	中坡位	虽立地条件较好, 但仍不适宜生产木材	产水 > 固碳 > 木材生产 > 物种多样性	1450 ~ 1950	1200 ~ 1650	1000 ~ 1200
	下坡位	立地条件最佳, 适宜生产木材	木材生产 > 产水 > 固碳 > 物种多样性	1600 ~ 2200	1250 ~ 1650	1100 ~ 1200
半阴坡	上坡位	土层瘠薄, 较干旱, 不适宜生产木材	产水 > 物种多样性 > 固碳 > 木材生产	1200 ~ 1650	850 ~ 1200	800 ~ 1100
	中坡位	土层瘠薄, 较干旱, 不适宜生产木材	产水 > 固碳 > 物种多样性 > 木材生产	1400 ~ 1700	1000 ~ 1350	850 ~ 1150
	下坡位	虽立地条件较好, 但仍不适宜生产木材	产水 > 固碳 > 木材生产 > 物种多样性	1350 ~ 1850	1100 ~ 1500	950 ~ 1200
半阳坡	下坡位	土层瘠薄, 干旱, 不适宜生产木材	产水 > 固碳 > 物种多样性 > 木材生产	1100 ~ 1500	800 ~ 1100	750 ~ 1000

附录 C

(资料性)

六盘山半干旱区天然虎榛子灌丛生长指标和多种功能变化规律案例

为在六盘山半干旱区进行天然虎榛子灌丛的多功能管理定量决策,需量化灌丛生长指标和各个功能的变化规律,为此建立了相应的预测模型,提供了多功能管理案例。

C.1 灌丛生长指标随主要立地因子的变化

灌丛覆盖度 ($CD_{\text{灌}}$, 小数) 随坡向 (sa , °) 增加 (从阴坡转向阳坡) 先稳定, 在坡向 $70 \sim 130^\circ$ 时缓慢降低, 之后迅速降低; 随土层厚度 (sth , cm) 增加先快速增加, 在厚度 $10 \sim 25$ cm 内缓慢增加, 之后趋于稳定。通过连乘耦合坡向和土层厚度的影响, 建立了灌丛覆盖度模型 (式 C.1)。

$$CD_{\text{灌}} = \exp(-3.04 \times 10^{-11} \times sa^{4.54}) \times [1 - \exp(-0.436 \times sth^{0.334})] \quad \dots(\text{C.1})$$

$R^2=0.69$

灌丛叶面积指数 ($LAI_{\text{灌}}$) 与灌丛覆盖度的关系为式 C.2。 $LAI_{\text{灌}}$ 随坡向增加 (从阴坡转向阳坡) 先稳定后降低, 随土层厚度增加先快速增加后缓慢增加。

$$LAI_{\text{灌}} = \frac{\ln(1 - CD_{\text{灌}})}{-0.497} \quad \dots(\text{C.2})$$

$R^2=0.90$

C.2 主要功能的模型

C.2.1 灌下植物多样性保护功能

随灌丛覆盖度 ($CD_{\text{灌}}$, 小数) 增加, 灌下草本种数 ($SN_{\text{灌下草}}$) 线性降低 (式 C.3), 灌下草本覆盖度 ($CD_{\text{灌下草}}$, 小数) 也线性降低 (式 C.4)。

$$SN_{\text{灌下草}} = 24.13 - 18.67 \times CD_{\text{灌}} \quad \dots(\text{C.3})$$

$R^2=0.80$

$$CD_{\text{灌下草}} = 1 - 0.784 \times CD_{\text{灌}} \quad \dots(\text{C.4})$$

$R^2=0.91$

C.2.2 灌丛固碳功能

虎榛子灌丛的地上和根系生物量平均为 6.28 、 6.00 t/hm², 分别占总生物量的 51.15% 和 48.85% 。虎榛子地上生物量 ($W_{\text{灌-地上}}$, t/hm²)、地下生物量 ($W_{\text{灌-地下}}$, t/hm²) 和总生物量 ($W_{\text{灌-总}}$, t/hm²) 及植物碳密度 ($VCD_{\text{灌-植}}$, t/hm²) 均随坡向 (sa , °) 增加 (从阴坡转向阳坡) 先缓慢减少后快速降低, 随土层厚度 (sth , cm) 增加先快速增加后缓慢增加, 其模型为:

$$W_{\text{灌-地上}} = 20 \times \exp(-2.88 \times 10^{-6} \times sa^{2.68}) \times (1 - \exp(-0.187 \times sth^{0.465})) \quad \dots(\text{C.5})$$

$R^2=0.66$

$$W_{\text{灌-地下}} = 20 \times \exp(-2.98 \times 10^{-6} \times sa^{2.58}) \times (1 - \exp(-0.39 \times sth^{0.147})) \quad \dots(\text{C.6})$$

$R^2=0.63$

$$W_{\text{灌-总}} = 30 \times \exp(-4.01 \times 10^{-6} \times sa^{2.57}) \quad \dots(\text{C.7})$$

$$R^2=0.67$$

$$\times (1 - \exp(-0.37 \times sth^{0.36}))$$

$$VCD_{\text{灌-植}} = 20 \times \exp(-4.13 \times 10^{-6} \times sa^{2.56}) \quad \dots(\text{C.8})$$

$$R^2=0.67$$

$$\times (1 - \exp(-0.271 \times sth^{0.287}))$$

灌下草本及枯落物碳密度之和 ($VCD_{\text{灌-草+枯}}$, t/hm^2) 随灌丛覆盖度增加呈先升后降的变化:

$$VCD_{\text{灌-草+枯}} = 15.3 \times CD_{\text{灌}}^3 - 35.9 \times CD_{\text{灌}}^2 + 25.3 \times CD_{\text{灌}} - 4.08 \quad \dots(\text{C.9})$$

$$R^2=0.81$$

虎榛子灌丛的植物碳密度和灌下草本及枯落物碳密度平均分别占灌丛总植被碳密度 (虎榛子灌木本身碳密度和灌下草本及枯落物碳密度之和) 的 82.39% 和 17.61%。虎榛子灌丛总植被碳密度随坡向增加 (从阴坡转向阳坡) 先缓慢减少后快速降低, 随土层厚度增加先快速增加后缓慢增加。

C.2.3 灌丛产流功能

在计算虎榛子灌丛的长期生长季蒸散 ($ET_{\text{灌}}$, mm) 和基于水量平衡的长期生长季产水量 ($WY_{\text{灌}}$, mm) 时, 可忽略土壤含水量变化及其蒸散影响。建立了 $WY_{\text{灌}}$ 与灌丛叶面积指数 ($LAI_{\text{灌}}$) 和生长季降水量 (P , mm) 的关系:

$$WY_{\text{灌}} = P - ET_{\text{灌}} \quad \dots(\text{C.10})$$

$$R^2=0.70$$

$$= P - \left\{ 0.8434 \times \left[203.4 + 177 \times (1 - \exp(-3.003 \times LAI_{\text{灌}})) \right] \right. \\ \left. + 1.4483 \right\}$$

C.3 灌丛的多功能管理策略与案例

对灌丛进行多功能管理, 就是要合理调控灌丛覆盖度, 充分发挥灌丛的多种功能, 并利于保证灌丛本身稳定性。相应的决策程序为: 1) 明确灌丛的多种功能重要性排序; 2) 逐次利用主导功能和其它功能随灌丛覆盖度和立地条件变化的规律, 确定各自需要的覆盖度区间; 3) 权衡确定满足多功能管理需求的灌丛覆盖度区间, 其值不能超过特定立地条件能承载的最高灌丛覆盖度, 也不能使覆盖度单次调整幅度过大。表 C.1 是六盘山半干旱区几类典型立地的虎榛子灌丛多种功能重要性排序及其多功能覆盖度区间。

表 C.1 六盘山半干旱区典型立地的天然虎榛子灌丛多种功能重要性排序和多功能覆盖度区间

坡向	坡位	特征	多种功能的重要性排序	覆盖度区间
阴坡	上坡位	土层瘠薄, 土壤水分条件较好, 适宜产水	产水 > 固碳 > 物种多样性保护	0.75 ~ 0.90
半阴坡	上坡位	土层瘠薄, 土壤水分条件较差, 适宜产水	产水 > 固碳 > 物种多样性保护	0.65 ~ 0.80
半阳坡	上坡位	土层瘠薄, 土壤水分条件差, 适宜产水	产水 > 固碳 > 物种多样性保护	0.60 ~ 0.75
阳坡	上坡位	土层瘠薄, 土壤水分条件很差, 适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.45 ~ 0.60

附录 D (资料性)

六盘山半干旱区天然草地生长指标和多种功能变化规律案例

为实现六盘山半干旱区天然草地多功能管理的定量决策，需量化草地各主要生长指标和服务功能的变化规律。为此建立了相应的预测模型，提供了多功能管理案例。

D.1 草地生长指标随主要立地因子的变化

天然草地的覆盖度 ($CD_{草}$, 小数) 随坡向 (sa , °) 增加 (从阴坡转向阳坡) 呈先稳定 (坡向小于 110° 时) 后降低的变化, 随土层厚度 (sth , cm) 增加呈先升高 (土层厚度 < 50 cm 时) 后趋于稳定的变化。连乘耦合了坡向和土层厚度的影响, 并拟合了草地覆盖度模型 (式 D.1)。草地叶面积指数 ($LAI_{草}$) 与草地盖度存在指数关系 (式 D.2)。草地叶面积指数随坡向增加先缓慢降低后快速降低, 随土层厚度增加先快速增加后缓慢增加。

$$CD_{草} = \exp(-6.88 \times 10^{-7} \times sa^{2.49}) \times [1 - \exp(-0.362 \times sth^{0.412})] \quad \dots(D.1)$$

$R^2=0.46$

$$LAI_{草} = \frac{\ln(1-CD_{草})}{-1.226} \quad \dots(D.2)$$

$R^2=0.61$

D.2 主要功能的模型

D.2.1 草地植物多样性保护功能

草地多功能管理需维持良好的草本覆盖度和尽可能多的植物种类。草本植物种数 ($SN_{草}$) 随草地覆盖度 ($CD_{草}$) 增加呈先升高后降低的变化, 存在如下关系:

$$SN_{草} = -3.084 + 58.266 \times CD_{草} - 36.297 \times CD_{草}^2 \quad \dots(D.3)$$

$R^2=0.76$

D.2.2 草地植被固碳功能

基于草地的草本生物量 ($W_{草地}$, t/hm²) 与草地覆盖度 ($CD_{草地}$, 小数) 的关系 (式 D.4) 以及草本地上部分和根系的含碳率的质量加权平均值 ($C_{草}$, g/kg), 可计算草地植被碳密度 ($VCD_{草}$, t/hm²), 其随坡向增加 (从阴坡转向阳坡) 逐渐降低, 随土层厚度增加先快速增加后缓慢增加。

$$W_{草} = 1.5635 + 3.5768 \times CD_{草} \quad \dots(D.4)$$

$R^2=0.99$

$$VCD_{草} = 0.001 \times C_{草} \times W_{草} = 0.001 \times C_{草} \times (1.5635 + 3.5768 \times CD_{草}) \quad \dots(D.5)$$

D.2.3 草地产水功能

在计算草地的长期生长季蒸散 ($ET_{草}$, mm) 和基于水量平衡的长期生长季产水量 ($WY_{草}$, mm) 时, 可忽略土壤含水量变化及其蒸散影响。建立了 $WY_{草}$ 与草地叶面积指数 ($LAI_{草}$) 和生长季降水量 (P , mm) 的关系 (式 D.6), 其值随降水量增加而增大, 随坡向增加 (从阴坡转向阳

坡)而逐渐升高,随土层厚度增加而先较快降低后缓慢降低。

$$WY_{草} = P - ET_{草} = P - \left\{ 211.6 + 134.9 \times \left[1 - \exp(-0.5712 \times LAI_{草}) \right] \right\} \quad \dots(D.6)$$

$R^2=0.99$

D.3 草地多功能管理策略与案例

对天然草地进行多功能管理,就是要合理调控草地覆盖度,从而发挥草地的多种功能,还利于保证草地本身稳定性。相应的决策程序为:1)明确草地的多种功能重要性排序;2)逐次利用主导功能和其它功能随草地覆盖度和立地条件的变化规律,确定各自需要的覆盖度区间;3)权衡确定满足多功能管理需求的草地覆盖度区间,其值不能超过给定立地条件能承载的最大草地覆盖度,也不能使覆盖度单次调整幅度过大。表 D.1 是六盘山半干旱区几个典型立地的天然草地多种功能重要性排序及多功能覆盖度区间。

表 D.1 六盘山半干旱区典型立地的天然草地多种功能重要性排序和多功能覆盖度区间

坡向	坡位	特征	多种功能的重要性排序	覆盖度区间
半阴坡	上坡位	土层瘠薄,水分条件较差,适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.75 ~ 0.85
	中坡位	土层瘠薄,水分条件较好,适宜产水	产水 > 固碳 > 物种多样性保护	0.80 ~ 0.90
	下坡位	土层较厚,水热条件较好,适宜产水和固碳	产水 > 固碳 > 物种多样性保护	0.85 ~ 0.95
半阳坡	上坡位	土层瘠薄,水分条件差,适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.65 ~ 0.75
	中坡位	土层瘠薄,水分条件较差,适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.75 ~ 0.85
	下坡位	土层瘠薄,水分条件较好,适宜产水和固碳	产水 > 固碳 > 物种多样性保护	0.80 ~ 0.90
阳坡	上坡位	土层瘠薄,水分条件很差,适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.55 ~ 0.65
	中坡位	土层瘠薄,水分条件差,适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.65 ~ 0.75
	下坡位	土层瘠薄,水分条件较差,适宜产水	产水 > 物种多样性保护 > 固碳	0.70 ~ 0.80

附 录 E
(资料性)

六盘山半干旱区典型坡面森林植被配置和多种功能变化案例

在坡面尺度进行多功能森林植被管理,需在理解并量化森林植被结构与功能变化规律的基础上,合理制定既适应各坡位立地特征又满足多功能需求的森林植被配置方案,附表E是六盘山半干旱区叠叠沟小流域几个典型坡面的森林植被配置案例。在各坡向的坡面上,从坡顶到坡脚,坡度先增后减,土层厚度逐渐增大,植被生长逐渐变好,植被碳密度和木材蓄积逐渐增大,但产水逐渐减少,植物种数轻微减小或增大。在下面分析(及表格)中,考虑了各坡位可能生长的华北落叶松林、虎榛子灌丛、草地的组合,但仅调控华北落叶松林分结构,采用各坡位立地在林龄30 a时的多功能管理密度;计算林地产水时应用了平水年生长季降水量450 mm;各生长指标及功能均由前述模型计算得到。

在阴坡坡面(坡向 23°,表 E.1),考虑的第一种植被配置(情景I)是各坡位都为具多功能密度的华北落叶松林;第二种配置(情景II)是坡顶为虎榛子灌丛,其它坡位均为具多功能密度的华北落叶松林。计算表明,华北落叶松林产水功能低于灌丛,但其它 3 个功能高于灌丛。基于各坡段水平长度的加权平均,计算了整个坡面的平均功能,情景I、情景II的坡面生长季产水为 56.5、62.4 mm/a,木材蓄积为 96.37、69.65 m³/hm²,植被碳密度为 38.86、37.06 t/hm²,植物种数为 22、20 种;情景II比情景I增加产水功能 6.1 mm/a,但不同程度地降低了其它功能;与全坡面均生长最大密度(从上到下为 1800、2050、2300、2450、2550、2700 株/hm²)华北落叶松林情况的坡面平均功能(生长季产水 55.7 mm/a、木材蓄积 152.65 m³/hm²、植被碳密度 51.47 t/hm²、林下植物种数 21 种)相比,产水主导功能提高的更多些,但木材蓄积和植被碳密度也降低更多,然而林下植物种数变化不大。

表 E.1 六盘山半干旱区叠叠沟阴坡的各坡位森林植被配置及计算的生长指标和多种功能

坡面特征 / 植被情景 / 植被功能	上坡位		中坡位		下坡位	
	坡顶	坡上	坡中上	坡中下	坡下	坡脚
坡度(°)	17	23	24	26	19	12
平均土层厚度(cm)	43	63	97	120	141	175
代表的水平坡长(m)	40	60	50	50	60	40
各坡位植被类型配置	华北落叶松	虎榛子	华北落叶松	华北落叶松	华北落叶松	华北落叶松
林分密度配置 (tree/hm ²)	900	—	1100	1300	1500	1600
平均树(株)高(m)	8.30	1.35	8.86	9.53	9.87	10.14
平均胸径(cm)	11.83	—	11.96	12.14	12.09	12.12
郁闭度/覆盖度	0.49	0.78	0.60	0.71	0.76	0.79
叶面积指数	2.47	3.08	2.92	3.37	3.57	3.70
植被碳密度(t/hm ²)	25.42	11.9 1	30.96	37.51	42.79	46.06
木材蓄积(m ³ /hm ²)	50.34	0	68.15	91.11	109.33	121.51
植物种数(种)	23	10	23	22	21	20
生长季产水(mm/a)	83.5	127. 7	69.3	54.8	48.6	44.6

半阴坡各坡位均能生长乔木林、灌丛和草地，因此植被的坡位配置情景多样，表 E.2 列出了半阴坡（坡向 68°）可能性较高的植被类型配置及计算的生长指标和多种功能。按从坡顶到坡脚的顺序和华北落叶松林逐次减少（草地增多）的排列，可有 10 种组合。以坡顶生长虎榛子灌丛但其它坡位均为多功能密度的华北落叶松林（情景 I）、坡顶和坡上生长草地但其它坡位均为多功能密度的华北落叶松林（情景 IV）、仅坡脚生长多功能密度的华北落叶松林但其它坡位均为草地（情景 X）的三种情景为例，按坡段水平长度加权平均计算的坡面植被碳密度为 28.77、23.40、6.85 t/hm²，木材蓄积为 63.33、54.28、13.65 m³/hm²，植物种数为 21、22、21 种，生长季产水为 69.1、92.3、143.4 mm/a。说明随乔木林减少或草地增多，产水主导功能增强，植被碳密度和木材生产功能降低，植物种数仅轻微减少；与坡顶生长虎榛子灌丛但其它坡位生长最大密度的华北落叶松林（从上到下为 1750、1900、2000、2150、2250 株/hm²）的传统经营情况的坡面平均功能（植被碳密度 38.37 t/hm²、木材蓄积 90.62 m³/hm²、植物种数 21 种、生长季产水 68.3 mm/a）相比，多功能经营的产水功能提高更多，木材蓄积和植被碳密度降低更多，但植物种数变化不大。可根据森林植被多功能需求，在可能配置模式中优选。如无明确的多功能要求，可选择坡顶为草地或灌丛、坡上部为草地、其它坡位为华北落叶松林的配置模式，这利于提高产水主导功能，但需注意维持地表覆盖度足够高，以避免加大土壤侵蚀。

表 E.2 六盘山半干旱区叠叠沟半阴坡的各坡位森林植被配置及计算的生长指标多种功能

坡面特征/植被情景/植被功能	上坡位				中坡位				下坡位		
	坡顶		坡上		中上		中下		坡下		坡脚
坡度(°)	18		27		34		30		27		20
平均土层厚度(cm)	36		56		72		92		116		138
代表的水平坡长(m)	40		60		50		50		60		40
各坡位植被类型配置	虎榛子	草地	华北落叶松	草地	华北落叶松	草地	华北落叶松	草地	华北落叶松	草地	华北落叶松
林分密度配置(株/hm ²)	—	—	800	—	1000	—	1200	—	1400	—	1500
平均树(株)高(m)	1.17	0.33	8.37	0.38	8.73	0.41	9.10	0.44	9.46	0.46	9.74
平均胸径(cm)	—	—	11.71	—	11.70	—	11.68	—	11.65	—	11.69
郁闭度/覆盖度	0.76	0.78	0.51	0.83	0.60	0.86	0.67	0.88	0.72	0.90	0.75
叶面积指数	2.86	1.22	2.73	1.44	3.02	1.58	3.28	1.73	3.50	1.88	3.63
植被碳密度(t/hm ²)	9.80	1.60	23.08	1.67	27.66	1.71	32.42	1.74	37.30	1.77	40.33
木材蓄积(m ³ /hm ²)	0	0	45.26	0	59.35	0	74.79	0	91.33	0	102.41
植物种数(种)	10	21	23	21	23	21	22	20	22	20	21
生长季产水(mm/a)	127.8	170.8	75.2	162.7	66.0	158.1	57.8	153.6	50.9	149.6	46.5

半阳坡主要生长灌丛和草地，仅坡脚偶有乔木林。表 E.3 中半阳坡（坡向 113°）考虑的潜在植被分布包括坡顶和坡上部的灌丛或草地、中上部和中下部的草地、坡下部的草地、坡脚的乔木林或草地，给出了各坡位可能的植被配置及计算的生长指标和多种功能。按从坡顶到坡脚的顺序和乔木林与灌丛逐渐减少（草地增多）的排列，有 6 种组合。以坡顶和坡上为灌丛和坡脚为多功能密度的乔木林但其它坡位均为草地（情景Ⅰ）、坡顶和坡上部为灌丛但其它坡位均为草地（情景Ⅳ）、各坡位均为草地（情景Ⅵ）的三种情景为例，按坡段水平长度加权平均计算的坡面植被碳密度分别为 6.35、3.20、1.61 t/hm²，木材蓄积为 5.68、0.0、0.0 m³/hm²，植物种数为 18、18、21 种，生长季产水为 142.8、152.8、169.2 mm/a。说明随乔木林和灌丛减少或草地增多，产水功能增强，植被碳密度和木材蓄积降低，植物种数仅轻微增加或不变。可根据多种功能需求，在可能的配置模式中优选，如情景Ⅳ。

阳坡主要生长灌丛和草地，表 E.4 中阳坡（坡向 158°）考虑的潜在植被分布包括坡顶和坡上部的灌丛或草地，以及其它坡位的草地，因此有坡顶和坡上部为灌丛但其它坡位为草地（情景Ⅰ）、坡顶为灌丛但其它坡位为草地（情景Ⅱ）、所有坡位均为草地（情景Ⅲ）的 3 种组合。表 E.4 给出了各坡位的可能植被配置及计算的生长指标和多种功能。按坡段长度加权平均计算的这 3 种情景的坡面植被碳密度为 2.09、1.71、1.47 t/hm²，植物种数为 19、20、20 种，生长季产水为 162.5、174.2、182.9 mm/a。说明随着灌丛减少或草地增多，产水主导功能增加，植被碳密度降低，植物种数仅轻微增加。可根据对多种功能需求，在可能的配置模式中优选，如情景Ⅰ。

表 E.3 六盘山半干旱区叠叠沟半阳坡的各坡位森林植被配置及计算的生长指标多种功能

坡面特征 / 植被情景 / 植被功能	上坡位				中坡位		下坡位		
	坡顶		坡上		中上	中下	坡下	坡脚	
坡度(°)	19		25		27	31	26	28	
平均土层厚度(cm)	27		45		60	74	88	107	
代表的水平坡长(m)	40		60		50	50	60	40	
各坡位植被类型配置	虎榛子	草地	虎榛子	草地	草地	草地	草地	华北落叶松	草地
林分密度配置 (tree/hm ²)	—	—	—	—	—	—	—	1000	—
平均树(株)高(m)	0.83	0.26	0.98	0.31	0.33	0.35	0.37	7.70	0.39
平均胸径(cm)	—	—	—	—	—	—	—	11.29	—
郁闭度/覆盖度	0.69	0.69	0.74	0.75	0.79	0.81	0.82	0.51	0.84
叶面积指数	2.33	0.96	2.71	1.14	1.26	1.34	1.41	2.40	1.49
植被碳密度(t/hm ²)	6.09	1.49	6.44	1.57	1.61	1.64	1.66	24.83	1.68
木材蓄积(m ³ /hm ²)	—	—	—	—	—	—	—	46.21	—
植物种数(种)	12	20	11	21	21	21	21	22	21
生长季产水量(mm/a)	127.9	181.6	127.8	173.7	169.4	166.3	163.8	85.7	161.2

表 E.4 六盘山半干旱区叠叠沟阳坡的各坡位森林植被配置及计算的生长指标多种功能

坡面特征/植被情景/植 被功能	上坡位				中坡位		下坡位	
	坡顶		坡上		中上	中下	坡下	坡脚
坡度(°)	18		26		29	32	25	21
平均土层厚度(cm)	17		34		50	65	77	93
代表的水平坡长(m)	40		60		50	50	60	40
各坡位的植被配置	虎榛子	草地	虎榛子	草地	草地	草地	草地	草地
平均株高(m)	0.43	0.19	0.54	0.23	0.26	0.28	0.29	0.31
覆盖度	0.50	0.56	0.57	0.64	0.68	0.71	0.72	0.74
叶面积指数	1.41	0.67	1.68	0.84	0.93	1.00	1.04	1.09
植被碳密度(t/hm ²)	3.08	1.32	3.32	1.42	1.48	1.51	1.53	1.55
植物种数(种)	15	19	14	20	20	20	20	21
生长季产水量(mm/a)	129.9	195.5	128.7	187.2	182.6	179.7	177.9	176.0

附录 F
(资料性)

六盘山半干旱区叠叠沟小流域多功能森林植被空间配置案例

六盘山是黄土高原的重要水源地与山地林区。为缓解旱区林水矛盾和满足区域发展的多功能需求，要在流域、坡面、立地（坡位）尺度进行森林植被优化配置。其中流域尺度要在充分利用坡面和立地（坡位）尺度的多功能森林植被配置研究成果的基础上，重点关注具有多功能结构的各类森林植被的适宜数量和其空间分布格局的优化配置。

F.1 小流域基本情况和多功能管理要求

六盘山半干旱区叠叠沟小流域(东经 106°4'55"~106°9'15",北纬 35°54'12"~35°58'33")地处土石山区与黄土区交界处(图 F.1)属半干旱大陆性季风气候,年均气温 6-7℃,年均降水量 445 mm(研究年份 2006 年为 470 mm,视为平水年),年均潜在蒸发量 1420 mm(2006 年生长季 5-10 月为 986 mm)。小流域面积 25.4 km²,其中上、中、下游分别为 7.2、11.3、6.9 km²,对应海拔为 2220~2428、2140~2615、1975~2520 m。上游坡缓,<20°的面积占 89.6%,以黄土为主,土层较厚,除山脊在 1 m 左右外,一般大于 3 m;中、下游坡较陡,主要分布在 10~35°、20~40°,以灰褐土为主,土层较薄。小流域山体南北走向为主,因而多东坡或西坡。这里是森林草原和典型草原过渡区,主要植被有华北落叶松和杨树等人工林、天然灌丛、天然草地、农田。2006 年各类植被面积占比为草地 58.44%、农田 15.33%、华北落叶松林 3.88%、杨树林 1.99%、柳树林 0.20%、沙棘 3.49%、杂灌丛 13.44%、虎榛子 1.39%、河道(水体) 0.07%、居民点 1.49%、公路 0.38%(图 F.1)。

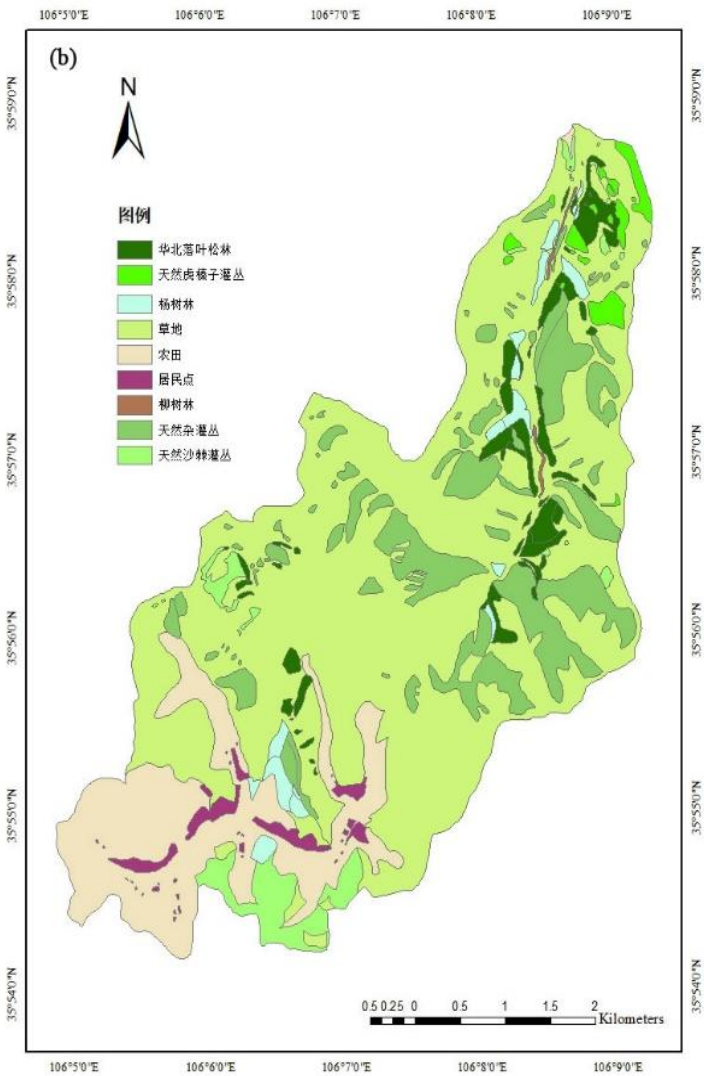


图 F.1 六盘山叠叠沟小流域的植被类型分布

叠叠沟小流域作为区域重要水源地，为保障区域供水安全，应选择产水为主导功能，同时要兼

顾土壤保持、固碳、木材生产、生物多样性保护等重要功能。

叠叠沟小流域森林覆盖偏低，需在水资源承载力范围内适当提高，但要避免大幅降低流域产水功能；另一方面，现有森林结构不良、质量差、功能低下，这是因长期受传统林业影响，主要关注木材蓄积，缺乏及时合理的经营，导致林分过密，使得森林不稳定和产水少。因而，急需开展林水协调的多功能管理，特别在小流域尺度提出面向多功能利用的森林数量、质量和空间格局配置方案。

F.2 小流域森林植被优化配置的原则与约束条件

在叠叠沟小流域进行多功能森林植被配置时，需考虑如下原则和约束条件：

- 1) 保障粮食安全，遵守农田保护红线，农田面积不减少，居民区不扩张；
- 2) 保障小流域内及下游的供水安全，必须保持足够的产水能力；
- 3) 保障水土保持生态安全，将土壤侵蚀控制在容许侵蚀量以下；
- 4) 因地制宜，适地适树，优先在土层厚、水分条件好的阴坡、半阴坡立地营造乔木林；
- 5) 进行植被类型转换时，森林面积只能增加不能减少；现有森林树种只能逐渐转变（如林下补植、天然更新，促进形成混交林），不能追求快速彻底改造（如完全替换树种）；
- 6) 维持良好的森林植被结构（如林冠郁闭度一般在 0.6~0.8，但在干旱瘠薄立地可适当降低）；模拟时的林分密度不能超过与林分平均胸径对应的最大密度；
- 7) 考虑投入效益，如优先在好的立地造林；坡度过陡不宜造林，宜封育，以免引起土壤侵蚀。

F.3 小流域多功能森林植被管理模型构建

采用 InVEST 模型（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs）计算和评估不同治理情景的小流域多种服务功能，应用 Carbon 模块、Water Yield 模块、SDR 模块评估碳储存、产水（降水量和实际蒸散的差）、土壤保持功能（潜在侵蚀量和实际侵蚀量的差）。

模型数据来源包括实测土地利用/植被覆盖类型图、典型植被的碳密度，实测数据内插的降水和潜在蒸散空间分布，实测的典型植被根系深度、土壤质地、植物可利用土壤水分，网站下载的 DEM 数据，基于实测降水数据计算并内插的降雨侵蚀力分布，基于实测土壤质地及有机碳含量计算并内插的土壤可蚀性因子 K，基于植被覆盖度计算的植被管理因子 C，从文献下载的工程措施因子 P。

利用小流域实测数据或类似地区的文献数据，验证了模型精度，表明预测的固碳和土壤保持功能基本可靠，产水功能精度较高，如华北落叶松林、沙棘灌丛、天然草地的生长季蒸散和产流误差分别在 0.01%~0.02%和 3.1%~12.2%。

F.4 小流域森林植被空间配置情景制定

在小流域进行森林植被空间配置，需将符合多功能管理要求的各类森林植被的数量落到具体地块（立地类型）上，因此需首先明确立地类型和植被质量要求。

主要立地因子分级：坡向分 4 级（阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡），坡度分 5 级（平坡 0~5°、缓坡 6~15°、斜坡 16~25°、陡坡 26~35°、急陡坡 > 36°），海拔分 4 级（在 2000~2400 m 每 100 m 一级），土层厚度分 4 级（薄，0-30 cm，仅适宜草地；较薄，30-60 cm，可适宜灌丛；

较厚，60-80 cm，可适宜乔木林；厚，>80 cm，不再是限制因素，可适合农作物）。

多功能森林结构的简化要求： 以往研究表明，兼顾林下灌草生物多样性保护功能要求的华北落叶松林最优冠层 LAI 为 2.95，为照顾应用灵活性，取两侧 10%对应值作为最优 LAI 范围(2.65 ~ 3.25)。本小流域案例中应用的兼顾多种功能的林冠 LAI 适宜范围为 2.7 ~ 3.0；在讨论森林覆盖率变化的多功能影响时，应用的华北落叶松林冠层 LAI 均取值 2.98，并暂时忽略了其坡位差异。

森林覆盖率变化情景制定： 除当前森林植被现状情景外，另有 46 个立地组合情景，包括草地转乔木林的 24 个立地组合（阴坡半阴坡的土层厚（>80 cm）和较厚（60 ~ 80 cm）的中间 3 个坡度级（6 ~ 15°、16 ~ 25°、26 ~ 35°）的所有 4 个海拔级）、灌丛转乔木林的 22 个立地组合（其它同上，但缺少坡度 16 ~ 25°和 26 ~ 35°时的 2000-2100 m 海拔组合）。随着将适宜立地的草地和灌丛转为乔木林，森林覆盖率从 6.05%逐渐升至 20.77%，但灌丛覆盖率从 18.39%降至 14.85%，草地覆盖率从 58.67%降至于 47.49%，农田和居民点面积占比一直不变。

F.5 森林覆盖率变化影响小流域多种功能的模拟结果

利用只改变植被类型（增加森林）和 2006 年气象数据的模拟结果，分析了小流域多种功能随华北落叶松林覆盖率增加的变化。

对产水功能的影响： 无论草地还是灌丛造林，除林冠层 LAI 为 0.65 的疏林情况外，均是小流域产水量随华北落叶松林覆盖率增加而线性减少（图 F.2）。以 LAI 等于 2.6 为例（对应林分郁闭度 0.72），森林覆盖率每增加 10%，小流域产水量降低 14 mm。对应 46 个情景的小流域产水量空间差异很大，变化在 2.95-377.14 mm；当小流域森林覆盖率从 6.05%升到 20.77%时，产水量从 131.75 mm 降到 110.54 mm 降低了 21.21 mm。

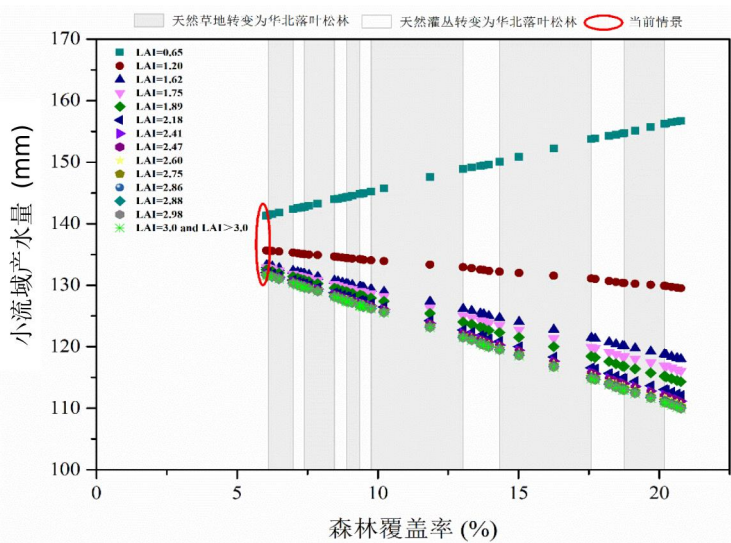


图 F.2 小流域产水随森林覆盖率和林分 LAI 变化模拟结果

对土壤保持功能的影响： 无论草地还是灌丛造林情景，小流域土壤侵蚀量都与森林覆盖率负相关(图 F.3)；森林覆盖率每增加 10% 小流域土壤侵蚀的降低量对草地造林为 279.6 t，对灌丛造林为 280.5 t；土壤侵蚀量响应存在波动，是海拔、坡度等因子差异导致的。在小流域森林覆盖率从 6.05%升到 20.77%的过程中，小流域土壤侵蚀的空间格局一直相对

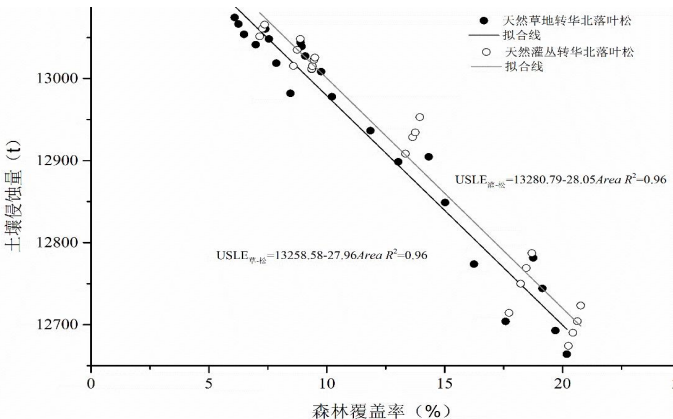


图 F.3 小流域土壤侵蚀量随森林覆盖率变化模拟结果

稳定，这是因高覆盖度的灌丛和草地同样能保护土壤免遭侵蚀。

对固碳功能的影响：模拟结果表明（图 F.4）。在林龄 40 a、土层厚度 100 cm、坡向 60°、造林密度 3000 株/hm²（实际最大密度 2178 株/hm²）的条件下，天然草地和灌丛造林后，森林覆盖率每增加 1%，小流域碳储量分别增加 1741.85t 和 1758.06 t；在其它假设条件一样仅是土层厚度 80 cm 和实际最大密度 2322 株/hm²的条件下，对应的小流域碳储量增加量为 2138.25 t 和 1998.12 t。

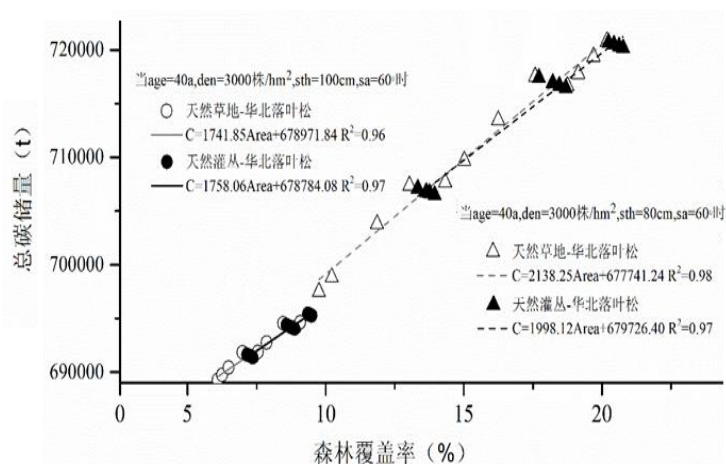


图 F.4 小流域总碳储量随森林覆盖率变化的模拟结果

F.6 面向多功能管理的小流域森林覆盖率和空间配置决策

F.6.1 小流域多功能森林覆盖率的确定

在面向多功能管理确定适宜森林覆盖率时，首先要确定各单一功能要求的多功能森林覆盖率范围，期间要考虑有关限制条件；然后，按小流域的多种功能重要性排序，在多个功能要求的森林覆盖率之间进行权衡，寻找交集（图 F.5），作为多功能森林覆盖率。

确定满足产水功能的小流域森林覆盖率，首先需量化产水功能要求。六盘山区年降水量相近的渝河流域 20 世纪 80 年代以前年均径流系数为 0.234，以此作为叠叠沟小流域产水功能要求，对应 2006 年生长季降水量 470 mm（平水年）的产水量为 110 mm。在华北落叶松林 LAI 均为 2.98 时，InVEST 模拟的小流域年产量（Y, mm）与森林覆盖率（X, %）存在着线性关系（ $Y = 140.5 - 1.49X$ ），据此得到满足产水功能要求的小流域森林覆盖率上限为 20.5%，即森林覆盖率可变化在 0~20.5%。

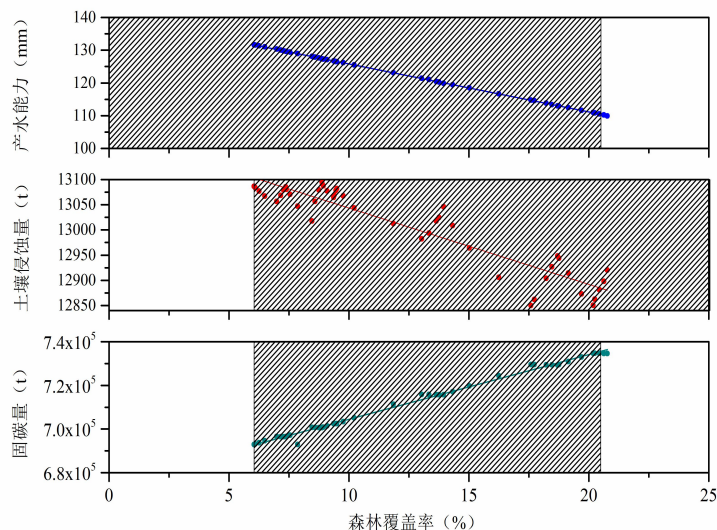


图 F.5 同时考虑产水、土壤保持、固碳功能要求的小流域适宜森林覆盖率范围确定

前人研究表明，黄土高原土石山区和黄土区土壤侵蚀治理度分别为 100%和 80%时的土壤侵蚀模数应低于 133.1 和 2695.0 t·km⁻²·a⁻¹，以此作为本案例小流域土石山区和黄土区的土壤侵蚀治理要求。在小流域当前森林植被情景下（森林覆盖率 6.05%）模拟的各类植被侵蚀模数（t·km⁻²·a⁻¹）

均能满足治理要求(华北落叶松林 55.12、柳树林 58.81、杨树林 88.40;虎榛子灌丛 57.17、杂灌丛 22.96、沙棘灌丛 103.40;草地 51.08;农田 2588.71)。考虑森林面积只能增加不能减少的要求,可视 6.05%为满足土壤保持功能要求的小流域森林覆盖率下限,即乔木林覆盖率应 $\geq 6.05\%$ 。

小流域产水功能和土壤保持功能要求的森林覆盖率交集范围为 6.05%~20.5%。此外,前面已表明小流域碳储量随乔木林覆盖率增加呈线性增大,所以固碳功能要求的森林覆盖率也以 20.5%为上限。由此确定小流域的多功能森林覆盖率范围为 6.05%~20.5% (图 F.5)。

F.6.2 小流域多功能森林植被空间配置格局的确定

在确定森林植被的适宜空间格局时,首先要明确立地类型及其多种功能的重要性排序,然后借助 ArcGIS 等空间分析软件,把适宜森林覆盖率按适地适树原则优先分配到较好立地。这里应用的立地因子等级划分标准与前面有所不同,开始时坡向仍分 4 级(阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡),海拔简化为 3 级(2000~2200、2200~2400、>2400 m),土层厚度简化为 3 级(<30 cm、30~80 cm、>80 cm),但坡度细化为 6 级(<5°、5-8°、8~15°、15~25°、25~35°、>35°)。然后,在 ArcGIS 中将 4 个图层叠加,获有效组合 192 个;将坡度合并为 3 级(<8°、8~25°、>25°)后剩 96 个组合,将面积占比<0.5%的立地类型合并后还剩 51 个组合,加上沟道类型,合计 52 个立地类型(见表 F.1)。

在小流域进行多功能森林植被空间配置时,要同时考虑乔木林(华北落叶松、白桦)、灌丛(虎榛子、沙棘)和天然草地的配置,合理利用各自的多种功能差异,如森林的木材生产、保持土壤、固碳等功能突出,但蒸散耗水多,所以不能过分追求森林覆盖率和忽视森林减少产水的作用;灌丛耗水相对较少,能适应土层较薄的立地,同时土壤保持和固碳功能较好;草地耗水少,利于多产水,若覆盖度较高时也能有效保护土壤免遭侵蚀。因此,应在考虑各类立地的多种功能重要性排序和适宜植被类型的基础上,合理进行森林植被空间配置。参考《DB 64/T 809-2023 宁南山区多功能水源涵养林营造技术规范》,提出了小流域的多功能森林植被配置方案(表 F.1)。

经过权衡产水、土壤保持和固碳功能要求的小流域森林覆盖率,配置了多功能森林植被的空间格局,图 F.6 是森林覆盖率最低值(6.05%)和最高值(20.5%)的情况。

表 F.1 叠叠沟小流域的多功能森林植被配置方案

立地类型	立地因子				面积比例/%	主要功能的重要性排序	植被配置	
	坡向	海拔/m	土厚/cm	坡度/°			适宜植被类型	适宜植物种
1	阴坡	>2400	<30	<8	0.72	产水、物种多样性保护、土壤保持、固碳	草（主）	披碱草、艾蒿
2			30~80	<8	0.94	产水、木材生产、物种多样性保护、土壤保持、固碳	乔、灌、草（主）	披碱草、艾蒿
3			0	8~25	4.73	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	乔、灌、草（主）	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊；披碱草
4				>25	0.91	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	乔、灌（主）、草	华北落叶松；沙棘、胡枝子、绣线菊；披碱草、艾蒿
5			>80	8~25	1.40	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
6				>25	0.58	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
7		2200~2400	<30	8~25	0.51	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	草（主）	披碱草、艾蒿
8		0	30~80	<8	1.13	产水、木材生产、物种多样性保护、土壤保持、固碳	乔、灌、草（主）	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等；披碱草
9			0	8~25	4.80	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
10				>25	1.50	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	灌（主）、草	沙棘、胡枝子、绣线菊等；披碱草、艾蒿
11			>80	<8	2.30	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
12				8~25	4.77	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
13				>25	2.49	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
14		2000~2200	30~80	8~25	0.75	产水、木材生产、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等+沙棘、绣线菊等
15			>80	8~25	2.70	产水、木材生产、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
16				>25	0.69	产水、木材生产、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
17	半阴坡	>2400	<30	8~25	1.24	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	草（主）	披碱草、艾蒿
18			30~80	<8	1.04	木材生产、产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
19			0	8~25	4.61	木材生产、产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
20				>25	1.23	木材生产、产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
21		2200~2400	30~80	<8	2.37	产水、木材生产、土壤保持、物种多样性保护、固碳	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
22			0	8~25	8.03	产水、土壤保持、木材生产、物种多样性保护、固碳	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
23				>25	3.07	产水、土壤保持、木材生产、物种多样性保护、固碳	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
24			>80	<8	2.85	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
25				8~25	5.41	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等

立地类型	立地因子				面积比例/%	主要功能的重要性排序	植被配置	
	坡向	海拔/m	土厚/cm	坡度/°			适宜植被类型	适宜植物种
26		2000~2200	> 80	> 25	1.96	木材生产、产水、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
27				< 8	1.08	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
28				8~25	2.06	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
29				> 25	0.81%	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	灌（主）、草	沙棘、胡枝子、绣线菊等；披碱草、艾蒿
30	半阳坡	> 2400	< 30	8~25	0.97	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	草（主）	披碱草、艾蒿
31			30~80	< 8	0.67	土壤保持、产水、木材生产、物种多样性保护、固碳	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
32				8~25	2.84	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	乔、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
33				> 25	1.20	产水、土壤保持、木材生产、固碳、物种多样性保护	灌（主）、草	沙棘、胡枝子、绣线菊等；披碱草、艾蒿
34			> 80	8~25	0.72	产水、木材生产、土壤保持、固碳、物种多样性保护	乔（主）、灌	华北落叶松、白桦等；沙棘、绣线菊等
35		2200~2400	< 30	8~25	0.45	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	草（主）	虎榛子；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
36			30~80	< 8	1.55	产水、物种多样性保护、土壤保持、固碳	灌（主）、草	虎榛子；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
37				8~25	4.88	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	灌（主）、草	虎榛子；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
38				> 25	1.21	产水、土壤保持、物种多样性保护、固碳	灌（主）、草	虎榛子；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
39			> 80	< 8	1.70	产水、木材生产、土壤保持、物种多样性保护、固碳	乔、灌（主）、草	虎榛子、胡枝子等；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
40				8~25	2.67	产水、土壤保持、木材生产、物种多样性保护、固碳	乔、灌（主）、草	虎榛子、胡枝子等；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
41				> 25	1.08	产水、土壤保持、木材生产、物种多样性保护、固碳	乔、灌（主）、草	虎榛子、胡枝子等；本氏针茅、铁杆蒿、艾蒿
42		2000~2200	30~80	8~25	0.52	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	灌（主）、草	绣线菊、胡枝子等；铁杆蒿、艾蒿
43			> 80	8~25	1.22	土壤保持、产水、物种多样性保护、固碳	灌（主）、草	绣线菊、胡枝子等；铁杆蒿、艾蒿
44	阳坡	> 2400	30~80	< 8	0.51%	产水、物种多样性、土壤保持、固碳	灌（主）、草	虎榛子等；艾蒿、苔草
45				8~25	1.98%	产水、土壤保持、物种多样性、固碳	灌（主）、草	虎榛子等；艾蒿、苔草
46				> 25	0.56%	产水、土壤保持、物种多样性、固碳	灌（主）、草	虎榛子等；艾蒿、苔草
47		2200~2400	30~80	< 8	0.58%	产水、物种多样性、土壤保持、固碳	灌（主）、草	虎榛子；铁杆蒿、苔草
48				8~25	2.50%	产水、土壤保持、物种多样性、固碳	灌（主）、草	虎榛子；铁杆蒿、苔草

立地类型	立地因子				面积比例 /%	主要功能的重要性排序	植被配置		
	坡向	海拔 /m	土厚 /cm	坡度 /°			适宜植被类型	适宜植物种	
49				> 25	1.03 %	产水、土壤保持、物种多样性、固碳	灌（主）、草	虎榛子；铁杆蒿、苔草	
50				> 80	< 8	1.61 %	产水、物种多样性、土壤保持、固碳	灌（主）、草	虎榛子；铁杆蒿、苔草
51					8~25	1.81 %	产水、土壤保持、物种多样性、固碳	灌（主）、草	虎榛子；铁杆蒿、苔草
52	沟谷					生产木材、土壤保持、物种多样性保护、固碳	乔、灌、草	华山松、油松；栒子；针茅	

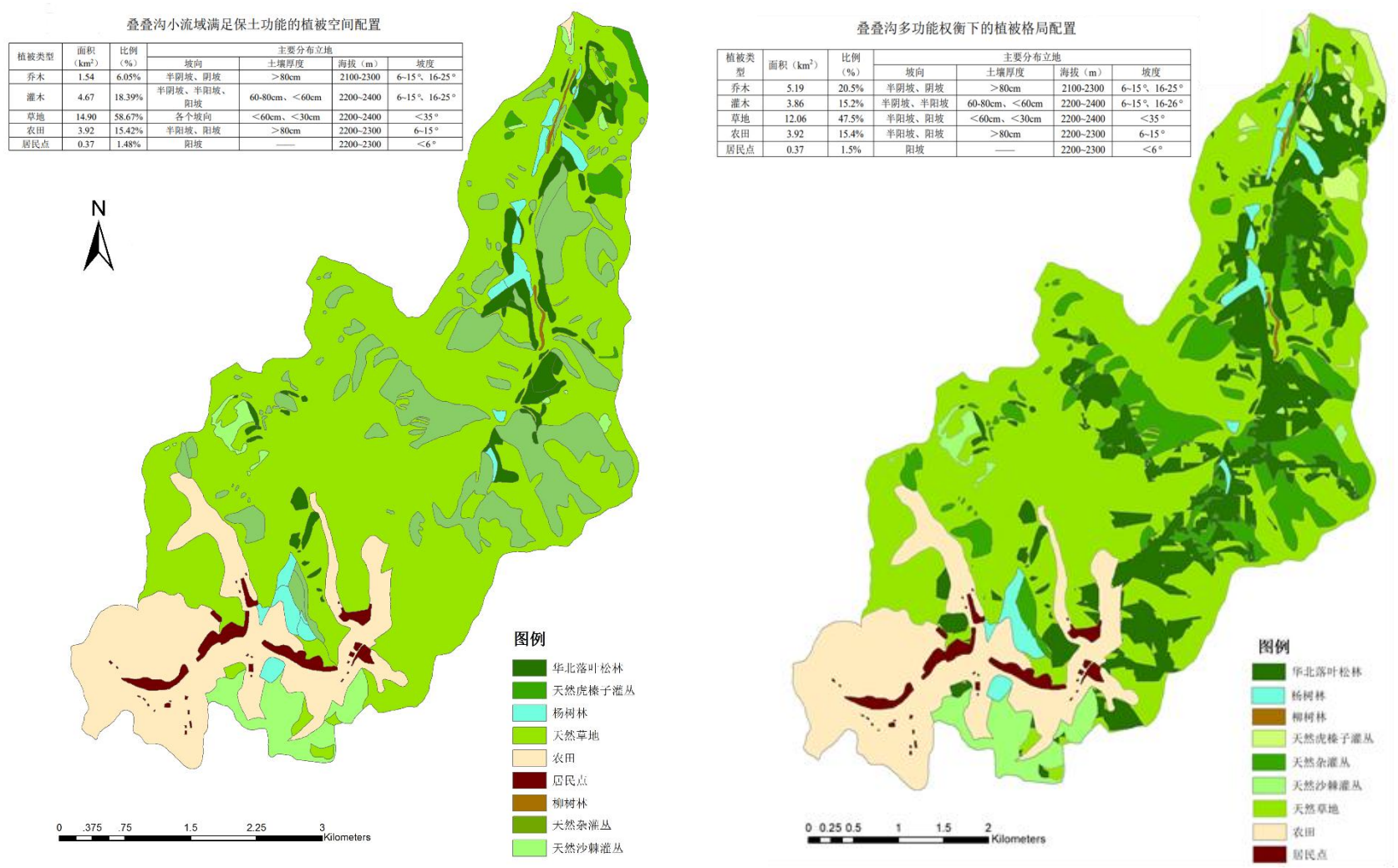


图 F.6 叠叠沟小流域森林覆盖率为 6.05% (左) 和 20.5% (右) 时的多功能森林植被空间配置

参考文献

- [1] 韩新生. 六盘山半干旱区三种典型植被的结构变化及其多功能影响 (D). 中国林业科学研究院, 2020.
- [2] 田奥. 六盘山半湿润区华北落叶松人工林的多种功能时空变化与优化管理 (D). 中国林业科学研究院, 2019.
- [3] 李佳梅. 六盘山半湿润区华北落叶松人工林结构的时空变化及其生态-水文影响 (D). 中国林业科学研究院, 2023.
- [4] 郝佳. 宁夏六盘山华北落叶松人工林密度对多功能的影响 (D). 中国林业科学研究院, 2012.
- [5] 王彦辉, 于澎涛, 田奥, 韩新生, 郝佳, 刘泽彬, 王晓, 2023, 黄土高原和六盘山区的林水协调多功能管理. 林业科学, 59(4): 1-17.
- [6] Pérez-Romero, J., González-Sanchis, M., Blanco-Cano, L., & Del Campo, A. D., 2025, Development of a multi-objective decision support system for eco-hydrological forest management that quantifies and optimizes ecosystem services related to Carbon, Water, Fire-risk and Eco-resilience (CAFE). Journal of Environmental Management, 380, 125103.
- [7] Costa, J.R.S., Brancalion, P.H.S., Joly, F.X., Simões L.H.P., Bonfanti J., Maire G. le, Robin A., Guillemot J., 2026, Forest Ecosystem Multifunctionality: A Systematic Review of Measures and Drivers. Current Forestry Report, 12, 2. <https://doi.org/10.1007/s40725-025-00266-4>
-