

DOI: 10.5846/stxb202206071611

徐亚莉, 张明芳, 李强, 余恩旭, 邓力豪, 邓诗宇, 刘子佩, 连晖. 基于植被和环境因子的亚高山森林土壤水源涵养功能空间尺度上推模型构建——以岷江上游杂谷脑流域为例. 生态学报, 2023, 43(13): 5614–5626.

Xu Y L, Zhang M F, Li Q, Yu E X, Deng L H, Deng S Y, Liu Z P, Lian H. Upscaling subalpine forest soil water-holding capacity based on vegetation and environmental factors: an example of the Zagunao River watershed in the upper reach of the Minjiang River in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5614–5626.

# 基于植被和环境因子的亚高山森林土壤水源涵养功能空间尺度上推模型构建 ——以岷江上游杂谷脑流域为例

徐亚莉<sup>1</sup>, 张明芳<sup>1,\*</sup>, 李 强<sup>2</sup>, 余恩旭<sup>1,3</sup>, 邓力豪<sup>1</sup>, 邓诗宇<sup>1</sup>, 刘子佩<sup>1</sup>, 连 晖<sup>1</sup>

1 电子科技大学资源与环境学院, 成都 611731

2 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

3 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

**摘要:** 土壤层水源涵养功能是森林水源涵养功能的主体。目前关于森林土壤水源涵养功能的研究主要集中在林地或坡面尺度上。由于流域尺度, 尤其是环境空间异质性强的西南亚高山区流域, 如何将林地尺度实测结果上推至流域或更大空间尺度仍是生态水文领域面临的巨大挑战之一。以川西岷江上游杂谷脑流域为研究对象, 融合多种森林类型样地实测与流域尺度多源遥感数据, 构建了基于植被和环境因子的林地-流域森林土壤水源涵养功能尺度转换模型, 实现了流域尺度土壤水源涵养功能快速评价及其空间分布预测。样地尺度研究结果表明各类型森林的土壤水文特性各异, 总体表现为天然林优于人工林, 混交林优于单纯林。林地土壤持水能力受到区域气候、植被、土壤及地形等因子的共同影响, 其中风速、NDVI 及林龄与土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。基于关键植被和环境因子构建的林地-流域土壤水源涵养功能尺度上推模型精度较高, 土壤最大持水量、土壤毛管持水量和土壤非毛管持水量模型拟合优度  $R^2$  分别为 0.700、0.720 和 0.908; 土壤最大持水量、土壤毛管持水量和土壤非毛管持水量的模型预测值与野外实测值的相关系数介于 0.69—0.79 之间, 平均误差均低于 20%, 表明模型预测结果可靠。利用构建的土壤水源涵养功能尺度上推模型, 估算得出流域尺度森林土壤持水量的空间分布, 其结果表明杂谷脑流域森林土壤持水量空间分异明显, 海拔较高区域森林土壤持水量最高, 其次为距道路和河流有一定距离的缓坡地带, 下游干旱河谷地区土壤持水量最低。本研究为亚高山森林生态功能的恢复和提升提供了科学依据和评价工具。

**关键词:** 亚高山森林; 土壤水源涵养; 尺度上推; 多元线性回归模型

## Upscaling subalpine forest soil water-holding capacity based on vegetation and environmental factors: an example of the Zagunao River watershed in the upper reach of the Minjiang River in China

XU Yali<sup>1</sup>, ZHANG Mingfang<sup>1,\*</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>, YU Enxu<sup>1,3</sup>, DENG Lihao<sup>1</sup>, DENG Shiyu<sup>1</sup>, LIU Zipei<sup>1</sup>, LIAN Hui<sup>1</sup>

1 School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

2 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Research Institute of Forest Ecology, Environment and National Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

**Abstract:** Soil water-holding capacity is the major part of forest water storage. Although extensive studies on forest water-

基金项目: 四川省科技厅杰出青年科技人才项目 (2022JDJQ0005); 国家自然科学基金项目 (31770759)

收稿日期: 2022-06-07; 网络出版日期: 2023-03-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mingfangzhang@uestc.edu.cn

holding capacity at plot or slope scales have been conducted, there remains a lack of effective approaches to extrapolate the forest water-holding capacity from plot to watershed scale due to the spatial heterogeneity of environmental factors especially in subalpine watersheds. Here, we used the Zagunao watershed in the western Sichuan as an example to construct the multivariable linear regression models for upscaling soil water-holding capacity from plot to watershed scales based on vegetation and environmental factors by integrating field experiments at a variety of forest types and remote sensing data at a watershed scale, which eventually enabled a rapid evaluation and spatial prediction of soil water-holding capacity at watershed scale. The forest plot level result showed that the water-holding capacity of natural forest was better than that of the artificial forest with the mixed forests better than monoculture. The correlation analysis suggested that soil water-holding capacity was jointly affected by climate, vegetation, soil, and topography such as wind speed, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and forest age. The upscaling models of the maximum soil water-holding capacity, capillary water-holding capacity and noncapillary water-holding capacity established based on vegetation and environment factors had good performance with the  $R^2$  of 0.700, 0.720, and 0.908, respectively. The correlation coefficients and mean relative errors based on observations and predictions of the maximum soil water-holding capacity, capillary water-holding capacity and noncapillary water-holding capacity models were between 0.69 and 0.79, and below 20%, respectively, which indicated the good reliability of the models. By use of the upscaling models, the spatial distributions of forest soil water-holding capacity at the watershed scale were estimated. As suggested by the model prediction, the spatial variations of forest soil water-holding capacity are distinct in the Zagunao watershed, where forests at higher elevations are featured with the highest soil water-holding capacity, followed by forests located at a certain distance from roads and rivers in the lower slopes, and the downstream arid valley area has the lowest soil water-holding capacity. The findings can provide effectively scientific supports and assessment tools for the improvement and restoration of ecological functions in subalpine forests.

**Key Words:** subalpine forest; soil water-holding capacity; upscaling; multivariable linear regression model

森林生态系统具有垂直结构复杂、地被物厚、土壤有机质丰富、土壤孔隙度大、地下根系深且密集、反照率低、冠层表面粗糙度及叶面积指数高等特点,在保持水土和涵养水源等方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。其中土壤层对降水分配的影响最为关键,其水源涵养量可占森林水源涵养总量的 90% 以上<sup>[2-4]</sup>,是森林生态系统涵养水源的主要场所。大量研究采用土壤最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量等指标来量化森林土壤的水源涵养能力<sup>[2]</sup>,这些指标与土壤孔隙状况密切相关。土壤层毛管孔隙度较大时,用于植被生长消耗的有效水分比例较大;土壤非毛管孔隙度较大时,能有效促进水分垂直和水平运移,补给和调节河川径流、减缓洪峰等,从而充分发挥涵盖储水、供水和调节径流等多重供给与调节服务的综合性水源涵养功能<sup>[5]</sup>。

川西林区作为我国西南亚高山森林的典型分布区,地处国家主体生态功能区的“川滇森林及生物多样性重点生态功能区”和国家生态修复与保护的“长江重点生态区”,系成都平原和长江上游重要的天然水库、碳库和基因库<sup>[6-7]</sup>。该地区在 20 世纪 50—70 年代经历大规模的森林采伐,森林生态系统遭到严重破坏;随后在一系列生态保护工程(如退耕还林、天然林保护工程等)的推动下,该地区森林生态服务功能逐渐恢复,其森林景观和水资源空间分布格局将随之发生巨大变化<sup>[8]</sup>。因此,开展川西地区森林水源涵养功能的研究,对推进该地区及西南地区森林生态恢复评价具有重要意义。

目前,关于森林植被水源涵养功能的研究多集中在林地或坡面尺度上<sup>[9-13]</sup>,但如何将林地尺度已取得的大量实验研究结果准确上推至流域等更大空间尺度,是林水资源管理和保护亟待解决的应用问题,同时也是多年来森林水源涵养功能的研究瓶颈之一<sup>[14]</sup>。水文环境条件(如地形地貌、土壤类型、植被条件及流域前期储水特征)和水文通量(如降水、蒸散发、径流等)的时空异质性通常被认为是造成小尺度的水源涵养功能难以以上推至较大尺度的主要原因<sup>[15]</sup>。与此同时,不同空间尺度上影响森林涵养水源的主导因子存在差异。在林地或坡面尺度上,森林水源涵养功能通常受到植被类型、冠层结构、郁闭度、蒸散、坡度、坡向及土壤孔隙状

况等因素影响;而在流域尺度上,森林水源涵养功能的影响因素则以气候(风速、降水、相对湿度)、地形(海拔、坡度、坡向)、土壤(类型、质地、土壤温度、土壤湿度)及植被状况等为主<sup>[16]</sup>。在区域尺度上,优势森林类型以及气候或地质因素对水热变化或成土过程的作用会显著影响区域森林水源涵养功能<sup>[17]</sup>。但由于尚缺乏对这些因子如何共同耦合影响森林水源涵养功能的定量评价研究,阻碍了尺度上推方法的发展。

有研究通过整理收集不同类型林地的水源涵养功能参数(林冠层截留率、枯落物层最大持水量、土壤非毛管孔隙度等),依据各类型林地面积将林地实测定量结果简单外推至流域尺度<sup>[4,18]</sup>,但难以准确反映森林生态系统涵养水源功能的空间变异。而分布式生态水文模型尽管考虑了空间异质性,但对不同类型森林生态水文功能缺乏精细化的刻画,难以满足林水资源管理的实际需求<sup>[15]</sup>。此外,分布式生态水文模型数据需求量大,模拟涉及的参数化过程繁琐,评价效率低,同时评价精度也依赖大量实测数据的验证。尤其在我国西南亚高山这类地形复杂、地质灾害多发、生态环境空间变异大、水文气象观测资料缺乏且实地采样困难的地区,其应用局限性较大。由此可见,森林水源涵养功能尺度上推仍然缺乏有效的方法。如何构建生态环境异质性精细化表达的森林水源涵养功能尺度上推模型,同时兼顾模拟评价效率是未来森林生态水文研究的重要挑战之一,也是我国大规模植被恢复和气候变化双重影响下林水资源管理的重要需求。

针对上述问题,本研究以川西典型亚高山森林区域——岷江上游杂谷脑流域为研究对象,结合野外实测和多源遥感数据以及室内实验分析,计算不同类型林地土壤层水源涵养量,并在充分考虑流域尺度森林水源涵养功能空间异质性的基础上,采用因子分析和多元线性逐步回归法,构建基于植被和环境因子的林地-流域土壤水源涵养功能尺度上推模型,实现流域尺度土壤水源涵养功能的快速评价与空间预测。本研究能够为大尺度水文模型估算森林水源涵养量提供实测试验数据<sup>[18]</sup>,提升对亚高山森林土壤层水源涵养功能的影响机制的认识,同时为区域森林水源涵养功能定量提供快速评价模型,助力森林和水资源适应性经营管理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

杂谷脑流域位于川西阿坝州理县境内(102°36′—103°38′E,31°12′—31°55′N),地处四川盆地与青藏高原的过渡地带,属典型的高山峡谷地貌(图1)。杂谷脑流域面积约4620 km<sup>2</sup>,海拔范围1321—5836 m,平均海拔3621 m,坡度介于0°—70°之间,平均坡度为32°。该地区属高山气候,以米亚罗镇为例,年平均气温10.56℃,1月最低气温2.23℃,7月最高气温16.84℃。降水集中在6—8月,年降水量620—1470 mm,年蒸发量1000—1900 mm,年无霜期约200 d。土壤类型丰富,以山地暗棕壤为主,其土壤特征表现为土层浅薄,土壤贫瘠且石砾含量较高<sup>[19–20]</sup>。受温度、水分等的影响,杂谷脑流域植被分布表现出明显的垂直地带性。以悬钩子(*Rubus corchorifolius*)、白刺花(*Sophora davidii*)、铁扫帚(*Indigofera bungeana*)等为主的草地灌丛主要分布在海拔2500 m以下的干旱河谷地区;以川滇高山栎(*Quercus aguiifolioides*)、桦木(*Betula*)、山杨(*Populus davidiana*)、岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、紫果云杉(*Picea purpurea*)、粗枝云杉(*Picea asperata*)等为优势树种的阔叶林、针叶林及混交林主要分布在海拔2500—3500 m的地区;海拔3500—4500 m的地区主要生长着由岷江冷杉和粗枝云杉组成的针叶林;海拔4500 m林线以上主要分布着糙野青茅(*Deyeuxia scabrescens*)、川滇绣线菊(*Spiraea schneideriana*)等高山灌丛和高山草甸<sup>[21]</sup>。

### 1.2 数据来源与预处理

本文使用数据分为实测数据和遥感数据。实测数据主要包括杂谷脑流域10种森林植被类型的林龄、树高、胸径、冠幅、郁闭度、土壤湿度、土壤温度、土壤盐度、土壤电导率以及土壤持水特性参数。遥感数据主要包括土地覆盖数据、气象数据(风速、温度、降水等)、植被数据(NDVI、LAI等)、土壤数据(土壤温度、土壤湿度、土壤相对湿度等)、地形数据(DEM、坡度、坡向)等(图2—4)。研究区土地覆盖数据是在LANDSAT 8 OLI数据基础上,结合野外实地调查及研究区地形信息、多时相遥感信息、遥感光谱指数等采用目视解译和决策树分类技术生成。气象数据则融合国家气象局(<http://data.cma.cn/>)提供的杂谷脑流域周边气象站点数据(经

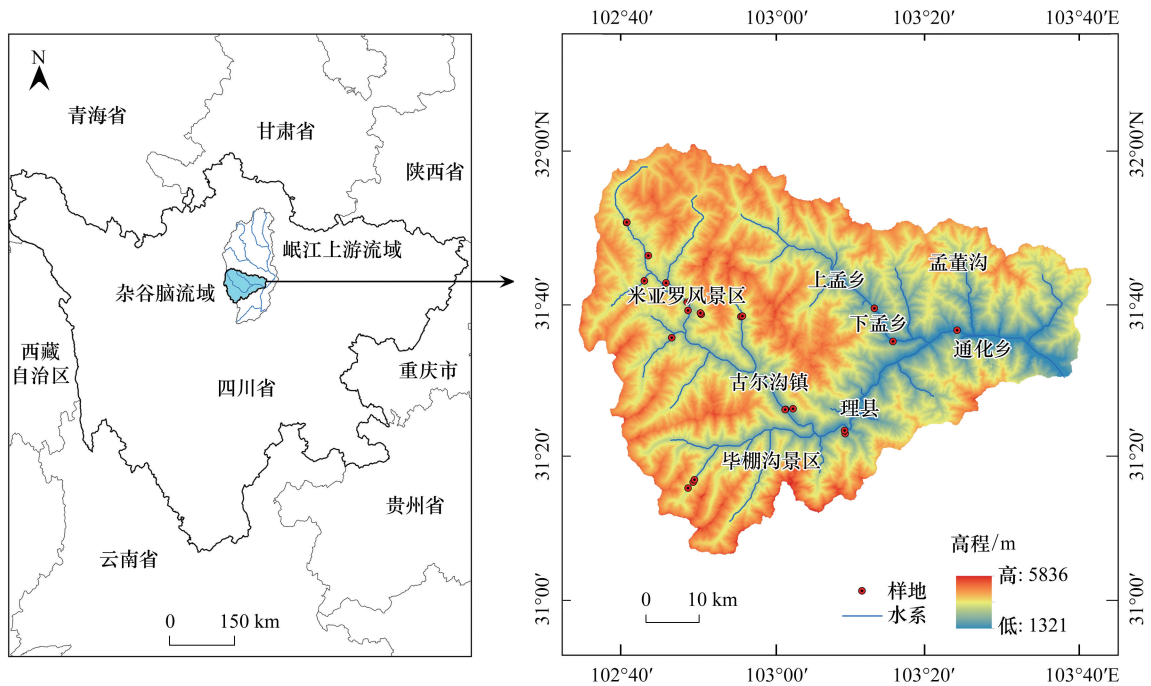


图1 杂谷脑流域地理位置及样地分布

Fig.1 The location of the Zagunao watershed and sample sites

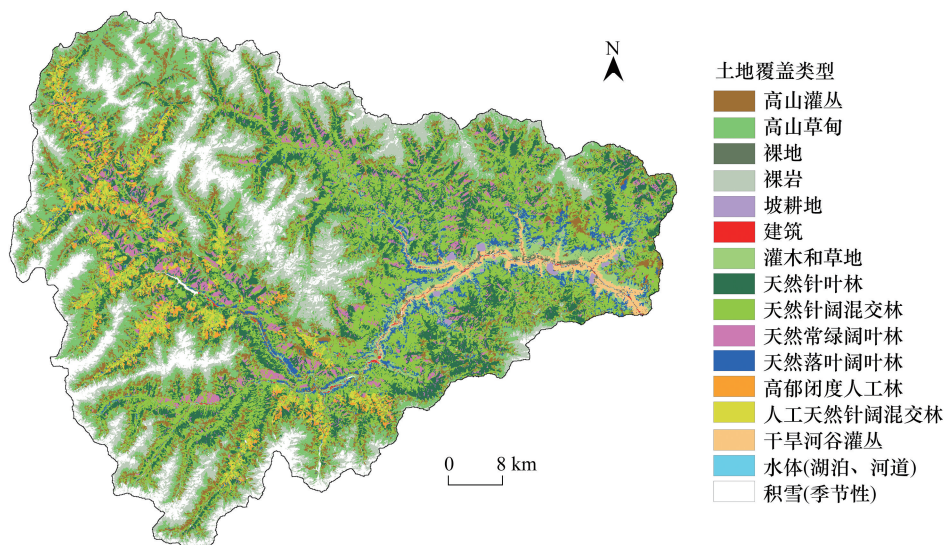


图2 杂谷脑流域土地覆盖类型分布

Fig.2 Land cover in the Zagunao watershed

ANUSPLIN 软件插值生成) 和陆面数据同化系统 GLDAS-V2.0。NDVI 和 LAI 数据分别下载自中科院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 和国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>)。土壤温度和土壤相对湿度数据来自国家气象局, 土壤湿度数据来自国家地球系统科学数据中心。DEM 数据下载自地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>), 并利用 ArcGIS 软件生成研究区坡度及坡向数据。所有数据经预处理后, 空间分辨率统一至 30 m。

### 1.3 研究方法

本研究按照如下技术路线开展(图 5)。

#### 1.3.1 林地土壤持水特性测定

结合实地踏勘和遥感影像数据,选取研究区 10 种代表性森林植被类型(天然针叶林(NC)、天然针阔混交林(NCB)、天然常绿阔叶林(NEB)、天然落叶阔叶林(NDB)、天然常绿/落叶阔叶混交林(NEDB,采伐迹地经自然演替形成)、人工天然针阔混交林(DCP,人工云杉林因环境或人为干扰退化形成)、高郁闭度人工林(HCCP)、中郁闭度人工林(MCCP)、低郁闭度人工林(LCCP)以及灌木林(BW)),分别于 2019 年 10 月和 2020 年 11 月进行两次野外样地调查与采样。综合权衡亚高山森林区域野外取样难度、实验处理周期及模型精度要求等因素,每一类型林地依据地形和海拔各设置 2—5 个典型样地(20 m×20 m,一级样地),共计 30 个样

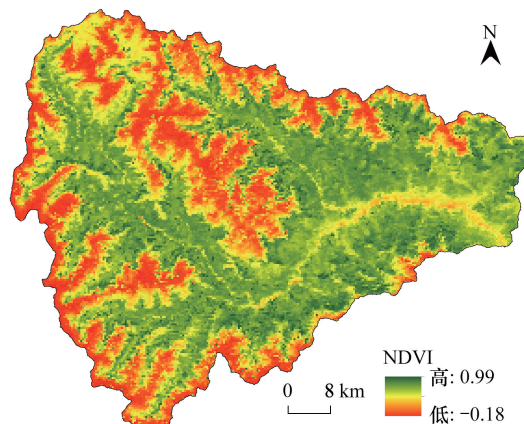


图 3 杂谷脑流域 2013—2017 年 10 月 NDVI 空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of NDVI in the Zagunao watershed in October from 2013 to 2017

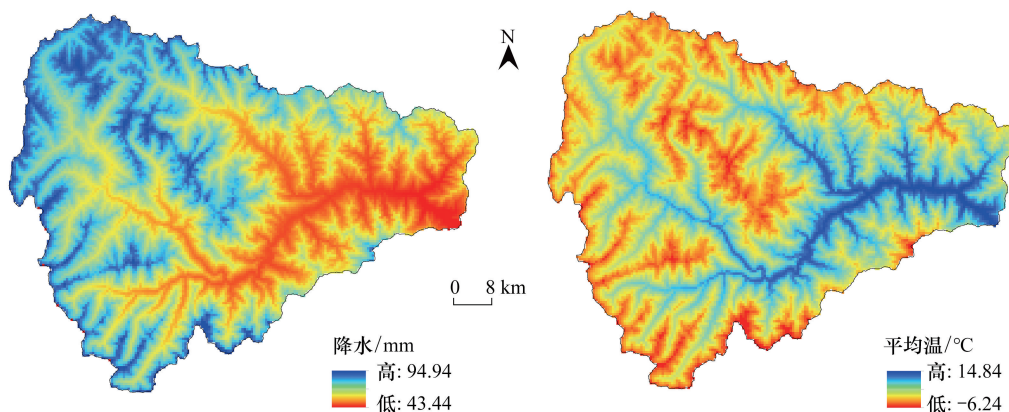


图 4 杂谷脑流域 2013—2017 年 10 月降水与温度

Fig.4 Precipitation and mean temperature in the Zagunao watershed in October from 2013 to 2017

地(图 1)。考虑到杂谷脑流域植被根系主要分布于石砾含量较低的 0—30 cm 土壤层,在各样地坡中、坡上或坡下位置挖两个土壤剖面,使用 60 mm<sup>3</sup> 环刀按 0—10、10—20 cm 及 20—30 cm 取 3 层原状土壤样本,每层 3 个重复,共计 540 个土壤样本。依照群落调查规范<sup>[22]</sup>调查和测量各样地地理坐标、坡度、坡向、树种、树高、胸径、冠幅、郁闭度等信息。

参照《森林土壤定位研究方法》<sup>[23]</sup>,使用环刀法 1 次取样连续测定样品土壤的容重及孔隙度等土壤持水特性指标。首先将装有原状土壤的环刀在水中浸泡 12 h 并称重( $m_{s1}$ , g);然后放置于砂上 2 h,此时环刀中土壤的非毛细水已全部流出,称重( $m_{s2}$ , g);最后将环刀土壤放入烘箱中烘干,记录烘干土质量( $m_{s0}$ , g)。本文中土壤水源涵养功能以土壤持水量表征。其中,土壤最大持水量为毛管持水量和非毛管持水量之和。具体计算公式如下:

$$D = \frac{m_{s0} - m}{V} \quad (1)$$

$$K_{\max} = \frac{m_{s1} - m_{s0}}{V} \quad (2)$$

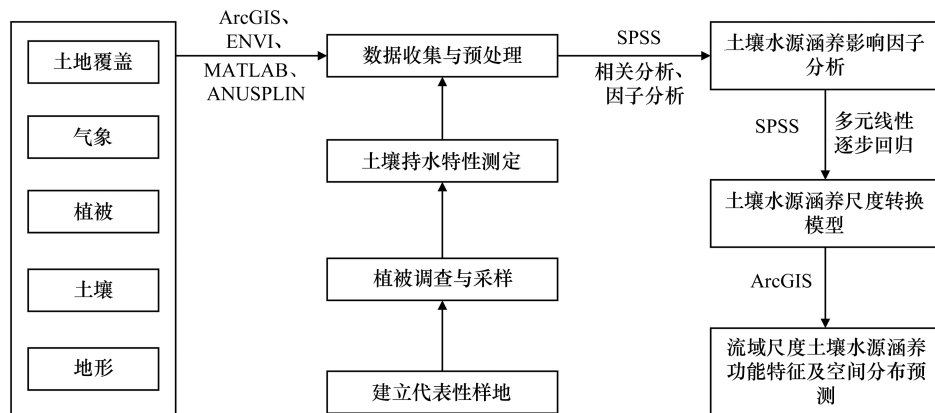


图5 研究技术路线

Fig.5 Research design

$$K_{cap} = \frac{m_{s2} - m_{s0}}{V} \quad (3)$$

$$K_{non} = K_{max} - K_{cap} \quad (4)$$

$$W_{max} = K_{cap} \times H \times 100 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 \quad (5)$$

$$W_{non} = K_{non} \times H \times 100 \times 1.0 \text{ g/cm}^3 \quad (6)$$

式中,  $W_{max}$  为单位面积土壤最大持水量 ( $\text{t/hm}^2$ );  $W_{non}$  为单位面积土壤非毛管持水量 ( $\text{t/hm}^2$ );  $D$  为土壤容重 ( $\text{g/cm}^3$ );  $K_{max}$  为土壤总孔隙度 (%);  $K_{cap}$  为土壤毛管孔隙度 (%);  $K_{non}$  为土壤非毛管孔隙度 (%);  $m$  为环刀重 (g);  $V$  为环刀容积 ( $\text{cm}^3$ );  $H$  为土层厚度 (cm)。

### 1.3.2 土壤水源涵养影响因子分析

在不同尺度上,森林土壤水源涵养功能主要受到区域气候、植被、土壤和地形等多种因子影响<sup>[18]</sup>,需选取对森林土壤持水量具有显著影响的因子参与建模以降低模型冗余度。依据每块样地经纬度坐标,提取采样月份近3—5年的气候、植被、土壤、地形四大类共计40个常见的土壤水源涵养功能影响因子<sup>[24]</sup>(表1)。采用Pearson相关分析筛选出与林地尺度森林土壤水源涵养量存在潜在相关性的影响因子,再选取显著相关的环境因子进行因子分析,降低各类影响因子间的相关性( $KMO \geq 0.6$ ,  $MSA \geq 0.5$ , 巴特利特球形检验  $P \leq 0.05$ ),保留最具代表性的因子用于构建林地-流域土壤水源涵养功能尺度上推模型。上述相关性分析及因子分析均基于SPSS 22.0软件实现。

表1 土壤持水量影响因子

Table 1 Impact factors of soil water-holding capacity

| 因子类型 Factor type        | 影响因子 Impact factor                                                                                                             |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 气候因子 Climatic factor    | $W_s, T_{min}, T_{max}, T_m, P_{a-3}, P_{a-2}, P_{a-1}, P, S_d, H_r, T_a, H_s, W_{s2}, P_s, R_{sw}, T_s$                       |
| 植被因子 Vegetation factor  | NDVI, LAI, $V_a, V_h, V_d, V_{cw}, V_{cd}$                                                                                     |
| 土壤因子 Soil factor        | $H_u^{10}, H_u^{40}, H_u^{100}, H_r^{10}, H_r^{20}, H_r^{50}, T_s^{10}, T_s^{40}, T_s^{100}, T_s^{200}, S_m, T_{s2}, S_s, S_c$ |
| 地形因子 Topographic factor | $E_e, S, A_s$                                                                                                                  |

$W_s$ : 风速;  $T_{min}$ : 最低温;  $T_{max}$ : 最高温;  $T_m$ : 平均温;  $P_{a-3}$ : 前期降水(3个月);  $P_{a-2}$ : 前期降水(2个月);  $P_{a-1}$ : 前期降水(1个月);  $P$ : 当月降水;  $S_d$ : 日照时数;  $H_r$ : 相对湿度;  $T_a$ : 2 m 气温;  $H_s$ : 2 m 比湿;  $W_{s2}$ : 10 m 风速;  $P_s$ : 地面气压;  $R_{sw}$ : 短波辐射;  $T_s$ : 地表温度; NDVI: 归一化植被指数; LAI: 叶面积指数;  $V_a$ : 林龄;  $V_h$ : 树高;  $V_d$ : 胸径;  $V_{cw}$ : 冠幅;  $V_{cd}$ : 郁闭度;  $H_u^{10}$ : 0—10 cm 土壤湿度;  $H_u^{40}$ : 10—40 cm 土壤湿度;  $H_u^{100}$ : 40—100 cm 土壤湿度;  $H_r^{10}$ : 0—10 cm 土壤相对湿度;  $H_r^{20}$ : 10—20 cm 土壤相对湿度;  $H_r^{50}$ : 20—50 cm 土壤相对湿度;  $T_s^{10}$ : 0—10 cm 土壤温度;  $T_s^{40}$ : 10—40 cm 土壤温度;  $T_s^{100}$ : 40—100 cm 土壤温度;  $T_s^{200}$ : 100—200 cm 土壤温度;  $S_m$ : 实测表层土壤含水率;  $T_{s2}$ : 实测表层土壤温度;  $S_s$ : 土壤盐度;  $S_c$ : 土壤电导率;  $E_e$ : 海拔;  $S$ : 坡度;  $A_s$ : 坡向

1.3.3 土壤水源涵养尺度上推模型构建

在相关性分析和因子分析的基础上,随机选取 2/3 的样地进行多元线性逐步回归建模(SPSS 22.0 软件),确保每一植被类型至少一个样地参与建模;余下 1/3 的样地用于模型精度验证。此外,考虑到不同森林类型具有不同的生物学特性和土壤结构,为提高模型准确度,在逐步回归建立的土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量的多元线性回归模型基础上,将 10 种森林类型作为虚拟变量引入模型(森林类型为无序分类变量,虚拟变量赋值为 1—10,其取值仅作为分类数据标识使用),最终选取  $R^2$  更大的模型作为最佳预测模型。最后依据建立的预测模型,利用 ArcGIS 栅格计算工具估算杂谷脑流域土壤层的最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量(空间分辨率 30 m),并对比不同持水量的空间分布特征。

2 研究结果

2.1 林地土壤持水特性

林地尺度研究结果表明,不同类型森林各土层容重范围在 0.62—1.52 g/cm<sup>3</sup> 之间,且随着土壤深度增加而增加。其中 0—10、10—20 cm 和 20—30 cm 土壤层容重均值依次为 1.09 g/cm<sup>3</sup>、1.20 g/cm<sup>3</sup> 和 1.26 g/cm<sup>3</sup> (表 2)。就不同类型森林各土壤层容重来看,天然针叶林的土壤容重均最低,灌木土壤容重均最高。

表 2 不同森林类型土壤持水特性  
Table 2 Soil water-holding properties of different forest types

| 森林类型<br>Forest type | 土层<br>Soil depth<br>/cm | 容重<br>Bulk density<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 总孔隙度<br>Total porosity<br>/% | 毛管孔隙度<br>Capillary porosity<br>/% | 非毛管孔隙度<br>Noncapillary porosity<br>/% | 最大持水量<br>Maximum water-holding capacity/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 毛管持水量<br>Capillary water-holding capacity/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) | 非毛管持水量<br>Noncapillary water-holding capacity/<br>(t/hm <sup>2</sup> ) |
|---------------------|-------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| NC                  | 0—10                    | 0.62±0.09                                   | 73.54±4.27                   | 57.26±5.62                        | 16.28±3.12                            | 735.42±42.77                                                     | 572.64±56.22                                                       | 162.78±31.23                                                           |
|                     | 10—20                   | 0.63±0.13                                   | 67.32±4.34                   | 52.18±4.54                        | 15.14±1.54                            | 673.19±43.37                                                     | 521.81±45.43                                                       | 151.39±15.43                                                           |
|                     | 20—30                   | 0.88±0.08                                   | 67.94±2.40                   | 53.11±3.86                        | 14.83±1.89                            | 679.44±23.97                                                     | 531.11±38.58                                                       | 148.33±18.91                                                           |
| NCB                 | 0—10                    | 0.91±0.11                                   | 63.97±7.81                   | 48.69±6.46                        | 15.28±1.58                            | 639.72±78.15                                                     | 486.94±64.59                                                       | 152.78±15.81                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.10±0.15                                   | 57.95±7.38                   | 43.15±7.89                        | 14.80±1.88                            | 579.54±73.79                                                     | 431.48±78.94                                                       | 148.06±18.78                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.20±0.16                                   | 57.45±6.02                   | 43.02±5.70                        | 14.43±1.03                            | 574.44±60.19                                                     | 430.14±56.94                                                       | 144.31±10.29                                                           |
| NDB                 | 0—10                    | 1.02±0.10                                   | 58.58±6.08                   | 45.12±5.95                        | 13.46±1.54                            | 585.83±60.80                                                     | 451.18±59.53                                                       | 134.65±15.39                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.14±0.15                                   | 54.27±4.35                   | 40.82±4.04                        | 13.45±1.71                            | 542.71±43.48                                                     | 408.19±40.37                                                       | 134.51±17.05                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.14±0.15                                   | 52.99±2.41                   | 40.00±2.51                        | 12.99±0.77                            | 529.91±24.15                                                     | 400.00±25.08                                                       | 129.91±7.70                                                            |
| NEB                 | 0—10                    | 1.20±0.11                                   | 47.78±6.89                   | 37.20±6.42                        | 10.58±2.04                            | 477.81±68.88                                                     | 372.03±64.21                                                       | 105.78±20.40                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.17±0.15                                   | 46.71±5.32                   | 36.89±6.46                        | 9.82±1.96                             | 467.08±53.16                                                     | 368.89±64.52                                                       | 98.19±19.53                                                            |
|                     | 20—30                   | 1.27±0.08                                   | 44.20±3.51                   | 34.75±3.77                        | 9.44±1.04                             | 441.94±35.05                                                     | 347.50±37.67                                                       | 94.44±10.34                                                            |
| NEDB                | 0—10                    | 1.18±0.11                                   | 52.38±2.82                   | 38.51±2.62                        | 13.88±1.91                            | 523.83±28.20                                                     | 385.06±26.18                                                       | 138.78±19.13                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.24±0.10                                   | 51.38±6.15                   | 37.65±5.96                        | 13.73±1.28                            | 513.83±61.55                                                     | 376.50±59.57                                                       | 137.33±12.74                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.28±0.11                                   | 46.59±3.94                   | 33.47±4.01                        | 13.12±1.51                            | 465.89±39.47                                                     | 334.72±40.14                                                       | 131.17±15.07                                                           |
| DCP                 | 0—10                    | 1.05±0.09                                   | 41.24±7.22                   | 26.58±6.28                        | 14.66±4.31                            | 412.36±72.13                                                     | 265.83±62.80                                                       | 146.53±43.07                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.30±0.10                                   | 42.17±3.44                   | 28.83±2.77                        | 13.34±1.67                            | 421.67±34.36                                                     | 288.24±27.65                                                       | 133.43±16.72                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.32±0.10                                   | 40.87±4.58                   | 27.42±4.94                        | 13.45±2.35                            | 408.70±45.81                                                     | 274.17±49.43                                                       | 134.54±23.47                                                           |
| HCCP                | 0—10                    | 1.25±0.16                                   | 47.66±8.79                   | 33.47±8.54                        | 14.19±2.47                            | 476.57±87.90                                                     | 334.72±85.38                                                       | 141.85±24.67                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.27±0.08                                   | 46.01±5.40                   | 31.54±5.78                        | 14.47±1.14                            | 460.09±53.95                                                     | 315.37±57.79                                                       | 144.72±11.37                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.35±0.12                                   | 42.57±7.78                   | 28.91±7.63                        | 13.66±1.70                            | 425.74±77.82                                                     | 289.17±76.24                                                       | 136.57±16.98                                                           |
| MCCP                | 0—10                    | 1.07±0.13                                   | 51.05±8.44                   | 38.25±9.23                        | 12.80±1.47                            | 510.46±84.35                                                     | 382.50±92.30                                                       | 127.96±14.66                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.28±0.13                                   | 40.71±8.41                   | 28.20±8.80                        | 12.51±1.34                            | 407.13±84.05                                                     | 282.04±88.04                                                       | 125.09±13.45                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.27±0.12                                   | 42.37±10.00                  | 28.75±9.10                        | 13.61±2.55                            | 423.61±99.98                                                     | 287.50±91.01                                                       | 136.11±25.48                                                           |
| LCCP                | 0—10                    | 1.16±0.10                                   | 57.09±5.36                   | 42.30±6.26                        | 14.79±2.38                            | 570.83±53.56                                                     | 422.96±62.62                                                       | 147.87±23.81                                                           |
|                     | 10—20                   | 1.41±0.12                                   | 46.05±5.76                   | 32.33±4.92                        | 13.72±1.76                            | 460.56±57.63                                                     | 323.33±49.21                                                       | 137.22±17.58                                                           |
|                     | 20—30                   | 1.36±0.09                                   | 42.55±5.10                   | 28.93±5.86                        | 13.62±2.22                            | 425.46±50.98                                                     | 289.26±58.57                                                       | 136.20±22.23                                                           |
| BW                  | 0—10                    | 1.39±0.10                                   | 38.77±6.48                   | 30.17±8.03                        | 8.60±4.05                             | 387.67±64.77                                                     | 301.67±80.27                                                       | 86.00±40.47                                                            |
|                     | 10—20                   | 1.46±0.14                                   | 37.23±6.95                   | 30.47±6.68                        | 6.75±1.06                             | 372.22±69.54                                                     | 304.72±66.75                                                       | 67.50±10.58                                                            |
|                     | 20—30                   | 1.52±0.09                                   | 36.59±4.50                   | 29.38±5.11                        | 7.21±1.19                             | 365.83±44.92                                                     | 293.75±51.10                                                       | 72.08±11.89                                                            |

表中数据为平均值±标准差;NC:天然针叶林 Natural coniferous forest;NCB:天然针阔混交林 Natural coniferous and broad-leaved mixed forest;NDB:天然落叶阔叶林 Natural deciduous broad-leaved forest;NEB:天然常绿阔叶林 Natural evergreen broad-leaved forest;NEDB:天然常绿/落叶阔叶混交林 Natural evergreen/deciduous broad-leaved forest;DCP:人工天然针阔混交林 Degraded coniferous plantation;HCCP:高郁闭度人工林 High canopy coniferous plantation;MCCP:中郁闭度人工林 Medium canopy coniferous plantation;LCCP:低郁闭度人工林 Low canopy coniferous plantation;BW:灌木林 Bushwood

各类型森林各土层土壤孔隙度及持水量则随着土壤深度的增加总体呈下降趋势。各类型森林土壤总孔隙度波动范围在 36.59%—73.54% 之间,均值为 49.90%,其中 0—10、10—20 cm 和 20—30 cm 土层总孔隙度均值分别为 53.21%、48.98% 和 47.41%。不同类型森林土壤毛管孔隙度在 26.58%—57.26% 之间变化,均值为 36.91%。土壤非毛管孔隙度介于 6.75%—16.28% 之间,均值为 12.95% (表 2)。

根据分层实测的土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别逐层相加得出土壤 0—30 cm 最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量。该地区土壤持水量总体表现为天然林高于人工林,且混交林高于人工纯林。其中天然针叶林 0—30 cm 土层的最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量分别高达 2088.05 t/hm<sup>2</sup>、1625.56 t/hm<sup>2</sup> 及 462.50 t/hm<sup>2</sup>,表明天然针叶林的土壤水源涵养功能最强,具有区域顶级群落的生态水文功能特征。

## 2.2 土壤水源涵养影响因子分析

相关性分析表明(表 3),与土壤层最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量显著相关的异质性因子分别有 9 个、8 个和 19 个。其中,风速、NDVI 及林龄与土壤各持水量均呈极显著正相关( $P<0.01$ )。此外,土壤最大持水量与前期降水(3 个月)(即 7—8 月降水)、相对湿度、10 m 风速、表层土壤含水率、海拔和坡度显著相关( $P<0.05$ );土壤毛管持水量与前期降水(3 个月)、相对湿度、10 m 风速、坡度及坡向显著相关( $P<0.05$ );土壤非毛管持水量与最低温、平均温、日照时数、2 m 气温、2 m 比湿、地面气压、地表温度、胸径、树高、冠幅、土壤温度(0—10 cm、10—40 cm、40—100 cm、100—200 cm)、实测表层土壤含水率及海拔显著相关( $P<0.05$ )。

表 3 0—30 cm 土壤水源涵养量与影响因子相关性检验 (Pearson 显著相关)

Table 3 Correlation test between 0—30 cm soil water-holding capacity and impact factors (significant correlation)

| 影响因子<br>Impact factor   |             | 最大持水量<br>Maximum water-holding capacity | 毛管持水量<br>Capillary water-holding capacity | 非毛管持水量<br>Noncapillary water-holding capacity |
|-------------------------|-------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 气候因子 Climatic factor    | $W_s$       | 0.500 **                                | 0.442 **                                  | 0.509 **                                      |
|                         | $T_{\min}$  | -0.230                                  | -0.168                                    | -0.457 *                                      |
|                         | $T_m$       | -0.202                                  | -0.150                                    | -0.386 *                                      |
|                         | $P_{a-3}$   | 0.402 *                                 | 0.413 *                                   | 0.052                                         |
|                         | $S_d$       | 0.242                                   | 0.171                                     | 0.523 **                                      |
|                         | $H_f$       | 0.373 *                                 | 0.393 *                                   | -0.050                                        |
|                         | $T_a$       | -0.288                                  | -0.235                                    | -0.425 *                                      |
|                         | $H_s$       | -0.322                                  | -0.262                                    | -0.473 *                                      |
|                         | $W_{s2}$    | 0.383 *                                 | 0.376 *                                   | 0.157                                         |
|                         | $P_s$       | -0.247                                  | 0.187                                     | -0.449 *                                      |
|                         | $T_s$       | -0.264                                  | -0.209                                    | -0.422 *                                      |
| 植被因子 Vegetation factor  | NDVI        | 0.590 **                                | 0.533 **                                  | 0.535 **                                      |
|                         | $V_a$       | 0.532 **                                | 0.481 **                                  | 0.473 **                                      |
|                         | $V_d$       | 0.186                                   | 0.131                                     | 0.399 *                                       |
|                         | $V_h$       | 0.115                                   | 0.062                                     | 0.367 *                                       |
|                         | $V_{cw}$    | 0.296                                   | 0.237                                     | 0.455 *                                       |
| 土壤因子 Soil factor        | $T_s^{10}$  | -0.259                                  | -0.203                                    | -0.430 *                                      |
|                         | $T_s^{40}$  | -0.231                                  | -0.174                                    | -0.429 *                                      |
|                         | $T_s^{100}$ | -0.204                                  | -0.148                                    | -0.412 *                                      |
|                         | $T_s^{200}$ | -0.203                                  | -0.150                                    | -0.398 *                                      |
|                         | $S_m$       | 0.383 *                                 | 0.361                                     | 0.377 *                                       |
| 地形因子 Topographic factor | $E_v$       | 0.391 *                                 | 0.328                                     | 0.512 **                                      |
|                         | $S$         | -0.414 *                                | -0.387 *                                  | -0.292                                        |
|                         | $A_s$       | 0.113                                   | 0.383 *                                   | 0.347                                         |

\* 表示相关性达显著水平 ( $P<0.05$ ); \*\* 表示相关性达极显著水平 ( $P<0.01$ )

基于与土壤持水量存在潜在相关性的因子进行因子分析,去除冗余因子,进一步筛选异质性影响因子用于逐步回归建模。所选因子分析模型的 MSA(反映像相关矩阵对角线系数)和 KMO 检验结果均大于 0.6,且巴特利特球度检验  $P$  值小于 0.001,表明所选因子适合进行因子分析。结果表明,土壤最大持水量通过因子

分析的因子共 8 个,包括风速、前期降水(3 个月)、相对湿度、NDVI、林龄、表层土壤含水率、海拔和坡度。毛管持水量因子分析模型仅有风速、前期降水(3 个月)、NDVI、林龄、表层土壤含水率以及坡向共 6 个因子。非毛管持水量共 10 个因子通过因子分析,包含最低温、日照时数、2 m 比湿、地面气压、林龄、胸径、0—10 cm 土壤温度、10—40 cm 土壤温度及表层土壤含水率和海拔(表 4)。

表 4 0—30 cm 土壤水源涵养量因子分析模型

Table 4 Factor analysis models of 0—30 cm soil water-holding capacity

| 类型 Type                                       | 影响因子 Impact factor                                               | MSA          | KMO   | Bartlett's test P |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-------------------|
| 最大持水量<br>Maximum water-holding capacity       | $W_s, P_{a-3}, H_r, NDVI, V_a, S_m, E_v, S$                      | $\geq 0.641$ | 0.637 | 0.000             |
| 毛管持水量<br>Capillary water-holding capacity     | $W_s, P_{a-3}, NDVI, V_a, S_m, A_s$                              | $\geq 0.707$ | 0.659 | 0.000             |
| 非毛管持水量<br>Noncapillary water-holding capacity | $T_{min}, S_d, H_s, P_s, V_a, V_d, T_s^{10}, T_s^{40}, S_m, E_v$ | $\geq 0.668$ | 0.711 | 0.000             |

MSA:反映像相关矩阵对角线系数 Measure of sampling adequency; KMO:KMO 统计量 Kaiser-Meyer-Olkin statistic

2.3 土壤水源涵养功能尺度上推模型

2.3.1 模型构建

依据相关性分析和因子分析的结果,按照 Pearson 相关系数的大小次序将因子逐一引入回归模型,并进行显著性检验,从而选取出显著相关的因子作为模型的自变量,得到多元线性回归模型(所有模型的方差膨胀因子 VIF 均小于 10,且 DW 值均为 2 左右,表明模型不存在多重共线性)。其中 0—30 cm 土壤最大持水量预测模型的输入自变量为 NDVI、前期降水(3 个月)、坡度以及森林类型虚拟变量,模型拟合优度  $R^2$  为 0.700,显著性  $P<0.05$ ;0—30 cm 土壤毛管持水量预测模型输入自变量为前期降水(3 个月)、林龄、坡向以及森林类型,模型  $R^2$  为 0.720,显著性  $P<0.05$ ;0—30 cm 土壤非毛管持水量预测模型输入自变量为林龄、土壤含水率、海拔及森林类型,模型  $R^2$  达到 0.908,显著性  $P<0.01$ (表 5)。所得模型的拟合效果较好。

表 5 流域 0—30 cm 土壤水源涵养量多元线性回归模型

Table 5 Multiple linear regression models for 0—30 cm soil water-holding capacity at watershed scale

| 类型 Type                                       | 回归模型 Regression model                                                                                                                                                                                                                                                                  | $R^2$ | P     |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| 最大持水量<br>Maximum water-holding capacity       | $W_{max} = 373.04 + 795.99 \times NDVI + 10.41 \times P_{a-3} - 13.93 \times S + f_1(V_t)$<br>$f_1(V_t) = 53.38 \times V_2 + 31.66 \times V_3 + 81.85 \times V_4 - 28.56 \times V_5 - 7.40 \times V_6 + 40.98 \times V_7 - 28.40 \times V_8 - 44.33 \times V_9 - 20.23 \times V_{10}$  | 0.700 | 0.025 |
| 毛管持水量<br>Capillary water-holding capacity     | $W_{cap} = -740.33 + 15.20 \times P_{a-3} + 10.94 \times V_a - 0.72 \times A_s + f_2(V_t)$<br>$f_2(V_t) = -2.32 \times V_2 - 84.79 \times V_3 + 45.99 \times V_4 - 40.56 \times V_5 - 27.82 \times V_6 - 121.65 \times V_7 - 85.10 \times V_8 - 33.47 \times V_9 - 4.91 \times V_{10}$ | 0.720 | 0.020 |
| 非毛管持水量<br>Noncapillary water-holding capacity | $W_{non} = 394.60 + 0.56 \times V_a - 2.40 \times S_m + 0.015 \times E_v + f_3(V_t)$<br>$f_3(V_t) = 6.98 \times V_2 + 9.42 \times V_3 + 10.74 \times V_4 + 3.19 \times V_5 - 3.28 \times V_6 - 6.12 \times V_7 - 4.63 \times V_8 - 11.53 \times V_9 - 1.74 \times V_{10}$              | 0.908 | 0.001 |

不同森林类型虚拟变量取值:  $V_1=1$  代表 NEDB;  $V_2=2$  代表 NDB;  $V_3=3$  代表 NCB;  $V_4=4$  代表 NC;  $V_5=5$  代表 LCCP;  $V_6=6$  代表 MCCP;  $V_7=7$  代表 DCP;  $V_8=8$  代表 HCCP;  $V_9=9$  代表 BW;  $V_{10}=10$  代表 NEB

2.3.2 模型精度检验

通过计算模型预测值与野外实测值的平均相对误差、相关系数等指标对土壤水源涵养功能尺度上推模型进行精度检验。土壤持水量预测值与实测值的平均相对误差较小,土壤最大持水量、土壤毛管持水量和土壤非毛管持水量模型平均相对误差分别为 17.93%、19.59% 和 9.35%;相关系数分别为 0.77、0.69 和 0.79。由此可见,各模型相关系数较高,预测结果可靠(表 6)。

表 6 模型精度检验结果

Table 6 Model accuracy test results

| 模型<br>Model                                   | 标准差<br>Standard deviation | 标准误差<br>Standard error | 平均相对误差<br>Mean relative error/% | 相关系数<br>Correlation coefficient |
|-----------------------------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 最大持水量 Maximum water-holding capacity          | 334.03                    | 105.63                 | 17.93                           | 0.77                            |
| 毛管持水量 Capillary water-holding capacity        | 360.44                    | 113.98                 | 19.59                           | 0.69                            |
| 非毛管持水量<br>Noncapillary water-holding capacity | 45.82                     | 14.49                  | 9.35                            | 0.79                            |

## 2.4 流域土壤水源涵养功能空间特征

根据表 5 构建的林地-流域土壤水源涵养功能尺度上推模型推算出杂谷脑流域尺度不同森林类型 0—30 cm 土壤层最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量。结果显示(表 7),杂谷脑流域天然针叶林的土壤各类持水量均最高,而灌木林均最低,与林地尺度实测结果一致。模型针对不同森林类型的预测效果存在一定差异。就最大持水量和毛管持水量而言,除灌木林的流域平均值与实测值之间相对误差较大(大于 20%)外,天然针叶林、天然针阔混交林及天然落叶阔叶林的流域平均值与实测值之间的相对误差较小,均低于 5%;就非毛管持水量而言,天然针叶林、天然针阔混交林、高郁闭度人工林及退化人工林等几种森林类型的流域均值与实测值间的相对误差均低于 10%。

表 7 基于尺度上推模型杂谷脑流域尺度不同森林类型 0—30 cm 土壤水源涵养功能估算/(t/hm<sup>2</sup>)

Table 7 Watershed-scale 0—30 cm soil water-holding capacity of different forest types in the Zagunao watershed based on scaling models

| 森林类型<br>Forest type | 最大持水量<br>Maximum water-holding capacity | 毛管持水量<br>Capillary water-holding capacity | 非毛管持水量<br>Noncapillary water-holding capacity |
|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| NC                  | 2148.49±22.79                           | 1672.28±20.57                             | 505.20±3.75                                   |
| NCB                 | 1851.37±23.15                           | 1385.47±24.40                             | 489.85±4.95                                   |
| NEB                 | 1573.27±19.55                           | 1201.37±19.54                             | 434.11±3.75                                   |
| NDB                 | 1775.13±21.09                           | 1293.45±21.38                             | 466.80±0.14                                   |
| HCCP                | 1504.04±19.78                           | 1182.69±19.94                             | 440.24±0.17                                   |
| DCP                 | 1475.23±19.75                           | 1154.02±20.56                             | 447.99±0.22                                   |
| BW                  | 1366.70±21.58                           | 1105.85±22.09                             | 380.12±0.09                                   |
| 均值 Mean             | 1747.61±25.98                           | 1308.16±25.30                             | 470.74±7.45                                   |

表中数据为平均值±95%置信区间值

杂谷脑流域森林 0—30 cm 土壤水源涵养功能的空间变异明显(图 6)。流域 0—30 cm 土壤最大持水量在 794.51—3059.29 t/hm<sup>2</sup>之间,均值为 1747.61 t/hm<sup>2</sup>。其中杂谷脑镇以南、孟董沟及毕棚沟附近天然针叶林土壤最大持水量最高(2400 t/hm<sup>2</sup>以上),下游汶川县至理县干旱河谷地区的灌木林最低(1200 t/hm<sup>2</sup>以下)。

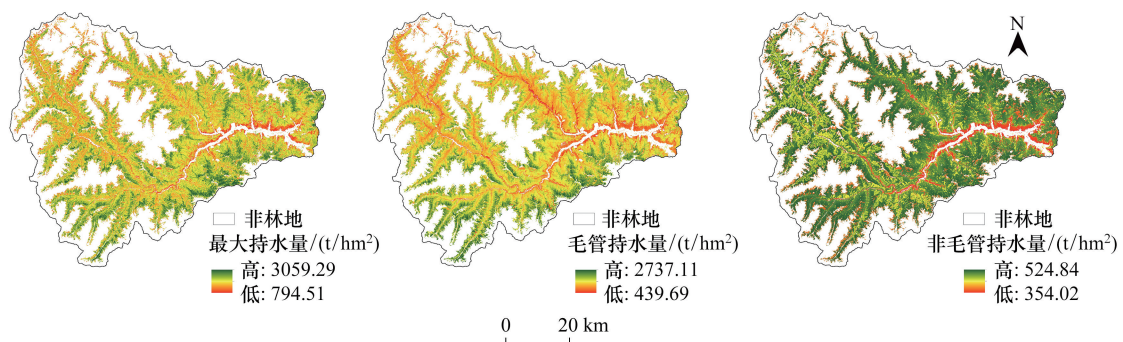


图 6 杂谷脑流域 0—30 cm 土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量空间分布

Fig.6 Spatial distribution of 0—30 cm soil maximum water-holding capacity, capillary water-holding capacity and noncapillary water-holding capacity in the Zagunao watershed

流域 0—30 cm 土壤毛管持水量介于 439.69—2737.11 t/hm<sup>2</sup> 之间,均值为 1308.16 t/hm<sup>2</sup>。空间上随海拔变异明显,形成了以下游干旱河谷地区、上孟乡至下孟乡地区及上游米亚罗风景区等地为代表的低值区(多在 800 t/hm<sup>2</sup> 以下,以灌木林及人工天然针阔混交林为主)和毕棚沟及杂谷脑镇为主的高值区(多在 1800 t/hm<sup>2</sup> 以上,以天然针叶林及天然针阔混交林为主)的空间分布格局。流域 0—30 cm 土壤非毛管持水量范围在 354.02—524.84 t/hm<sup>2</sup> 之间,均值为 470.74 t/hm<sup>2</sup>,其中流域上游以天然针叶林、天然针阔混交林、天然落叶阔叶林(多在 470 t/hm<sup>2</sup> 以上)和高山灌丛(多低于 400 t/hm<sup>2</sup>) 为主,均值(469.51 t/hm<sup>2</sup>) 略低于下游地区(473.87 t/hm<sup>2</sup>),下游干旱河谷地区最低。

### 3 讨论

#### 3.1 不同类型林地土壤水源涵养功能特性

杂谷脑流域各类型森林不同土层平均容重在 0.62—1.52 g/cm<sup>3</sup> 之间变化,均值为 1.18 g/cm<sup>3</sup>,与祁凯斌等人<sup>[8]</sup> 对川西亚高山地区天然针阔混交林和人工云杉林的研究结果基本接近(0.8—1.4 g/cm<sup>3</sup>,均值为 1.02 g/cm<sup>3</sup>)。但本研究的森林类型涉及林下土质较好的天然针叶林和干旱河谷地区土壤贫瘠的灌木林,故流域不同类型森林土壤容重的变幅相对更大。杂谷脑流域天然针叶林 0—30 cm 土壤孔隙度明显大于其他森林类型,其总孔隙度为 69.60%,该结果与霍小鹏等人<sup>[25]</sup> 的测定结果相似。天然针叶林(含原始林和天然次生林)非毛管孔隙度为 15.42%,总体低于何常清等人<sup>[26]</sup> 对岷江上游原始林的测量结果(18.08%)。杂谷脑流域各类型林地土壤水源涵养功能结果与徐丽宏等人<sup>[27]</sup>、祁凯斌等人<sup>[8]</sup> 的研究结果类似。天然针叶林由于林龄大、根系发达、有机质含量高,对土壤物理性质的改良作用最为明显<sup>[20]</sup>,导致其土壤容重最低、孔隙度最大,土壤水源涵养量最高。天然针阔混交林由于具有异龄的“乔-灌-草”复层结构,林内物种丰富度和郁闭度均较高,其土壤持水量也相对较高。不同郁闭度人工林多以单一云杉树种为主,密度大,林下植被生长受限<sup>[8]</sup>,加之受人工抚育、更新等营林作业的影响,林下土壤板结程度相对较高,导致其土壤持水量低于天然林。灌木林主要分布在干旱河谷地区和海拔较高的高寒地带,受气候条件限制,郁闭度低、枯落物少,导致林下土壤结构易受外力侵蚀破坏,其土壤水源涵养量相应最低<sup>[25,28]</sup>。

#### 3.2 环境因子对林地土壤水源涵养功能的影响

厘清环境因子对林地土壤持水量的影响是构建流域森林土壤水源涵养功能预测模型的基础。林下土壤层水源涵养功能除了与林冠层和地被物层有关,同时还受到气候、土壤及地形等环境因子的影响<sup>[16]</sup>。由于土壤毛管持水与非毛管持水具有显著不同的生态水文功能,其影响因素也存在一定差异。本研究发现,风速、NDVI 及林龄与 0—30 cm 土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。风速及林龄越大,林下枯落物储量越高,对减缓土壤蒸发及改善林地土壤理化性质起到积极作用<sup>[29—30]</sup>。NDVI 可反映出植物冠层背景等信息。NDVI 较大的森林类型通常具有较低的林内温度,分解者的活动强度可能在一定程度上受到抑制,从而有利于枯落物的积累;同时 NDVI 越大的森林类型其林下植被根系越发达,根系的穿插可显著改变土壤结构并增加土壤孔隙,进而提高土壤持水能力<sup>[8,31]</sup>。杂谷脑流域前期降水,即 7—8 月雨季降水强度大、历时长且沿着土壤孔隙下渗并在枯季补给地表水,是影响 0—30 cm 土壤最大持水量及毛管持水量的关键气候因子。此外,不同层次土壤温度与 0—30 cm 土壤非毛管持水量具有显著负相关性( $P < 0.05$ )。这可能是由于土壤温度升高使植物根系生理代谢作用增强,植物根系吸水速率加快引起植物生长耗水和土壤蒸散损失增大,最终导致土壤持水量降低<sup>[32]</sup>。地形因子(海拔、坡度等)通过影响水热条件来作用于森林土壤水源涵养功能。本研究发现森林土壤持水量与海拔呈正相关,而与坡度呈负相关。随着海拔上升,温度逐渐降低,区域蒸散发减少,利于森林土壤持水,但是高寒气候条件会同时限制森林植被生长发育,故森林土壤持水量随海拔的增加通常存在阈值。例如,李双权等人<sup>[4]</sup> 在长江上游地区的研究发现森林水源涵养功能随着海拔的升高呈正态分布,峰值高度出现在 4200 m 左右。而随着坡度的增加,坡面径流量及土壤侵蚀量增大,土壤易于流失,加之林木立地困难,生长发育受限,不利于土壤持水<sup>[33]</sup>。唐玉芝等人<sup>[34]</sup> 在乌江流域的研究结果得到类似结论,随着坡度的增加森林水源涵养功能呈现极显著的下降趋势,坡度平均每增加 1°,森林

水源涵养量相应减少了  $2.44 \text{ t/hm}^2$ 。

### 3.3 流域尺度森林土壤水源涵养功能空间特征及形成机制

本研究应用构建的基于关键植被和环境因子的森林土壤水源涵养功能尺度上推模型估算杂谷脑流域森林土壤水源涵养功能空间分布,为进一步探究其空间分布形成机制提供了有效工具。结果表明,受自然和人为因素影响,杂谷脑流域森林土壤水源涵养功能空间差异明显。气候条件(温度、降水等)的空间异质性和垂直地带性使不同地区、不同海拔带水热耦合状况各异,导致空间上形成不同的森林分布格局、地表状况及土壤结构<sup>[34]</sup>,加之植树造林、森林采伐、城市扩张等人类活动又进一步改变森林生态系统的结构和功能,从而对森林植被土壤水源涵养功能造成深刻影响。土壤水源涵养功能空间分异通常与森林类型分布关系最密切。不同森林类型的林分结构、林下微环境、土壤结构及孔隙特征不同<sup>[8]</sup>,导致其水源涵养特征也存在差异。杂谷脑流域土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量最高的区域均分布在较高海拔区域<sup>[35]</sup>。此区域温度较低、降水丰富且人为干扰少,广泛分布有喜冷喜湿的天然冷杉林,其叶表皮富含角质层或蜡质层,微生物分解作用缓慢<sup>[36]</sup>,林下易堆积形成较厚的枯落物层,对阻滞地表径流形成、减缓土壤蒸发和增加土壤表层渗透性等均起到积极作用<sup>[37]</sup>,从而使林下土壤持水量明显高于其他地区。各土壤持水量另一高值区域多位于远离道路和河流、海拔介于 2600—3700 m 之间的缓坡区域,主要生长着以冷杉、桦木及高山栎等为主的针阔混交林,其森林群落结构复杂,且林下主要是保水透气性较好的山地棕土及山地褐土,因此其土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量也相对较高。而下游理县至汶川县的干旱河谷区土壤持水量明显低于流域其他区域,该结果与同区域已有研究基本一致<sup>[38]</sup>。该区域温度较高且降水较少,河谷两侧通常发育有较高的山峰,易形成干热的焚风带离地面水汽<sup>[39]</sup>,使土壤含水率降低。同时受道路施工、房屋修建等人类活动及滑坡、泥石流等自然灾害影响,此区域土壤贫瘠、石砾含量高,水土流失较为严重<sup>[40]</sup>,加之恶劣的气候及土壤条件仅适宜低矮且根系零散的灌丛生长,多种因素叠加导致干旱河谷区林下土壤持水量最低。

### 3.4 研究局限与展望

针对林地尺度森林水源涵养功能测量结果如何上推至流域等更大空间尺度这一难题,本研究结合典型森林样地实测数据与多源遥感信息,构建了基于植被和环境因子的林地-流域森林土壤水源涵养功能尺度上推模型,实现了基于生态环境空间异质性精细化表达的流域尺度森林土壤水源涵养功能快速评价和空间分布预测。尽管本研究在充分把握流域植被类型特征的基础上,结合研究区林业专家建议,尽可能选取最具代表性样地,但由于高海拔地区取样困难,高海拔样本数总体偏少,构建的模型应用于高海拔地区森林产生的误差可能相对偏大,尤其是对灌木林预测的误差相对高于其他森林类型。因此,未来在不同海拔梯度带设计更大密度的野外观测及调查方案,并尝试采取分森林类型建模的方式进行森林土壤持水量的空间化表达有望进一步提高模拟精度。此外,本研究中对于模拟结果的验证主要依赖于有限的实测样地数据,未来可尝试利用区域水量平衡模型、生态水文模型模拟和 GRACE 陆地水储量遥感反演等多种方法进行交叉验证。森林土壤水源涵养功能会随着植被生长演替和环境变迁呈动态变化。本研究仅基于两年的非生长季林地土壤样本,若要全面了解流域森林土壤水源涵养功能的时空变异特征,还需在多个年份(丰水年、平水年和枯水年)、不同季节选取代表性样地进行取样监测和建模。最后,林地土壤水源涵养功能是受多个植被和环境因子共同作用形成,各个影响因子间可能对林地土壤水源涵养存在交互影响。未来预测建模需要考虑森林水源涵养功能影响因子间的交互影响。

## 4 结论

本研究表明林地尺度上森林土壤水源涵养功能表现为天然林优于人工林,且混交林优于单纯林。森林土壤水源涵养功能受到区域气候、植被、土壤及地形等因子的共同影响,其中风速、NDVI 及林龄与土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量均呈极显著正相关,7—8 月降水、相对湿度及坡度与土壤最大持水量和毛管持水量均显著相关。基于植被和环境因子建立的流域尺度森林 0—30 cm 土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量尺度上推模型精度较高,模型验证相对误差较小。应用构建的流域尺度水源涵养功能预测模型

得到的估算结果表明杂谷脑流域森林土壤水源涵养功能空间分异明显,土壤最大持水量、毛管持水量及非毛管持水量最高的地区均分布较高海拔区域,其次为距道路和水系有一定距离的缓坡地带,下游干旱河谷地区的土壤持水量最低。本研究为发展林地到流域土壤水源涵养功能尺度转换的方法做了有益尝试,对西南亚高山地区森林水源涵养功能的提升和水资源适应性经营管理提供了科学依据和评估工具。

#### 参考文献 (References):

- [1] 莫菲,李叙勇,贺淑霞,王晓学. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价. 生态学报, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [2] 刘世荣,温远光,王兵,周光益. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [3] 郝占庆,王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤涵蓄水性能的研究. 应用生态学报, 1998, 9(3): 237-241.
- [4] 李双权,苏德毕力格,哈斯,马广文. 长江上游森林水源涵养功能及空间分布特征. 水土保持通报, 2011, 31(4): 62-67.
- [5] 程欢,程一伦,宫洲波,熊仕臣,张亚贝,刘江山,刘良松,吴强,孙超. 川西北高山/亚高山区 6 种典型土壤类型水文效应. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 225-231.
- [6] 冯秋红,刘兴良,卢昌泰,吴晓龙,潘红丽,马文宝,刘世荣. 不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响. 生态学报, 2016, 36(17): 5432-5439.
- [7] 杨益帆,胡宗达,李亚非,余昊,吴德勇,欧定华. 川西亚高山川滇高山栎灌丛地被物与土壤持水性能. 应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 951-960.
- [8] 祁凯斌,黄俊胜,杨婷惠,包维楷,庞学勇. 亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响. 生态学报, 2018, 38(22): 8118-8128.
- [9] 孙向阳,王根绪,刘勇,柳林安,刘光生. 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应. 生态学报, 2013, 33(2): 501-508.
- [10] 薛建辉,郝奇林,何常清,吴永波. 岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究. 水土保持学报, 2009, 23(3): 168-172.
- [11] 刘一霖,温娅檬,李巧玉,陈娟,张小晶,吴福忠,杨万勤,谭波. 川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性. 水土保持学报, 2019, 33(5): 151-156, 162-162.
- [12] 朱万泽,盛哲良,舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应. 水土保持学报, 2019, 33(6): 205-212.
- [13] 余新晓,赵玉涛,张志强,程根伟. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究. 应用生态学报, 2003, 14(1): 15-19.
- [14] 丁程锋,张绘芳,李霞,李伟涛,高亚琪. 天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例. 生态学报, 2017, 37(11): 3733-3743.
- [15] 刘贤赵. 论水文尺度问题. 干旱区地理, 2004, 27(1): 61-65.
- [16] 王晓学,沈会涛,李叙勇,景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [17] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,周彬,高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [18] 刘璐璐,曹巍,邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价. 地理科学, 2016, 36(4): 603-611.
- [19] 郭永明,汤宗祥. 岷江上游水土流失及其防治. 山地研究, 1995, 13(4): 267-272.
- [20] 邓力濠,张明芳,师嘉祺,蒋志魏,张晨,余恩旭,杨晨. 岷江杂谷脑流域典型天然林和人工林林地水文效应研究. 西南林业大学学报, 2021, 41(3): 45-52.
- [21] 师嘉祺,余恩旭,徐亚莉,张明芳. 气候变化下西南亚高山森林景观恢复效果模拟预测——以岷江杂谷脑河上游流域为例. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 716-724.
- [22] 方精云,王襄平,沈泽昊,唐志尧,贺金生,于丹,江源,王志恒,郑成洋,朱江玲,郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [23] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [24] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展. 地理科学进展, 2002, 21(4): 341-348.
- [25] 霍小鹏. 川西亚高山不同植被类型林地水文效应及评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2009.
- [26] 何常清. 岷江上游两种典型森林群落生态水文特征研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [27] 徐丽宏,王彦辉,熊伟,于澎涛. 六盘山典型植被类型土壤水文生态功能研究. 林业科学研究, 2012, 25(4): 456-463.
- [28] 陈文静,祁凯斌,黄俊胜,杨婷惠,包维楷,庞学勇. 川西不同树种人工林对土壤涵水能力的影响. 生态学报, 2017, 37(15): 4998-5006.
- [29] 王美莲,王飞,姚晓娟,张秋良. 不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究. 生态环境学报, 2015, 24(6): 925-931.
- [30] 徐学华,于树峰,崔立志,黄选瑞,盖力岩. 冀北山地华北落叶松人工林水源涵养功能分析. 水土保持研究, 2009, 16(5): 162-166.
- [31] 赵鸣飞,薛峰,吕烨,左婉怡,王国义,邢开雄,王宇航,康慕谊. 黄土高原森林枯落物储量、厚度分布规律及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(22): 7364-7373.
- [32] 辛旋. 耐冬根系—土壤热湿耦合迁移规律及其对植物抗寒性影响的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- [33] 王秀英,曹文洪,陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究. 泥沙研究, 1998, (2): 38-43.
- [34] 唐玉芝,邵全琴. 乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 987-999.
- [35] Yu E X, Zhang M F, Xu Y L, Zhang S, Meng Z Z, Hou Y P. The development and application of a GIS-based tool to assess forest landscape restoration effects on water conservation capacity. Forests, 2021, 12(9): 1291.
- [36] 陈婷,郝敏,孔范龙,李悦,庞立华. 枯落物分解及其影响因素. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.
- [37] 韩景军,罗菊春,肖文发,张俊佩. 长白山北部林区检查法经营云冷杉林对枯落物分解及土壤含水率的影响. 林业科学研究, 2000, 13(1): 31-38.
- [38] 张晨. 区域森林生态系统服务功能评价系统实现及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [39] 林勇明,王道杰,周麟,陈婷婷,田兵伟,苏凤环. 岷江干旱河谷植物群落分布特征及梯度效应. 福建林学院学报, 2009, 29(4): 332-335.
- [40] 晏兆莉,陈克明,陈建中,王春明. 岷江干旱河谷的生态特征与植被恢复研究. 世界科技研究与发展, 2000, (S1): 36-38.