

大熊猫国家公园(四川片区)森林的水源涵养功能

徐亚莉, 田苗, 郑纪波, 袁艺溶, 赵文君

(四川省地质调查研究院 测绘地理信息中心, 四川 成都 610072)

摘要: [目的] 明晰大熊猫国家公园(四川片区)森林水源涵养功能的林型分异特征及空间格局, 为片区森林资源保护和水资源适应性经营管理提供指导。[方法] 基于大熊猫国家公园(四川片区)登记单元地籍调查—森林资源专项调查成果、样地调查及多源遥感数据等, 使用综合蓄水能力法计算片区森林的水源涵养量, 并分析不同森林类型和立地条件差异下的森林水源涵养功能特性。[结果] ① 片区森林生态系统的水源涵养总量为 $1.71 \times 10^9 \text{ m}^3$, 单位面积水源涵养量为 $1\ 061.27 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 土壤层是森林涵养水源的主要场所; 常绿针叶林的水源涵养功能最强。② 森林水源涵养功能的空间差异明显, 形成了雅安、绵阳、广元市等地较高, 阿坝州、德阳市等地较低的空间分布格局。③ 森林水源涵养总量主要集中在海拔(1 500, 3 500) m 地区, 其水源涵养贡献率达 90.10%; 森林单位面积水源涵养量随着海拔的升高呈显著的下降趋势 ($p < 0.01$)。④ 急坡($35^\circ, 45^\circ$)地区的森林水源涵养总量最高, 其水源涵养的贡献率为 24.01%; 森林单位面积水源涵养量随着坡度的增加呈显著的先升高后下降趋势 ($p < 0.01$)。[结论] 因地制宜地合理调整大熊猫国家公园(四川片区)的森林资源结构、优化森林资源布局, 有利于更大程度地发挥片区森林的水源涵养功能。

关键词: 森林水源涵养功能; 大熊猫国家公园; 综合蓄水能力法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0088-09

中图分类号: S715.3

文献参数: 徐亚莉, 田苗, 郑纪波, 等. 大熊猫国家公园(四川片区)森林的水源涵养功能[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 88-96. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.010; Xu Yali, Tian Miao, Zheng Jibo, et al. Evaluation on forest water conservation function of Giant Panda National Park in Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 88-96.

Evaluation on Forest Water Conservation Function of Giant Panda National Park in Sichuan Province

Xu Yali, Tian Miao, Zheng Jibo, Yuan Yirong, Zhao Wenjun

(Surveying and Mapping Geographic Information Center,

Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: [Objective] Forest type differentiation characteristics and spatial patterns of the forest water conservation function of Giant Panda National Park in Sichuan Province were examined, in order to provide guidance for the protection of forest resources and adaptive management of water resources in this area. [Methods] Based on the results of the cadastral and special forest resources survey in the Sichuan area of Giant Panda National Park, sample plots data, and multi-source remote sensing data, the integrated storage capacity method was applied to estimate the forest water conservation function. Its characteristics under different forest types and site conditions were then analyzed. [Results] ① The extent of water conservation of the forest ecosystem in this area was $1.71 \times 10^9 \text{ m}^3$, yielding a water conservation of $1\ 061.27 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ per unit area. The soil layer served as the main reservoir for water conservation. Evergreen coniferous forests exhibited the strongest water conservation function. ② There were notable spatial variations in forest water conservation function, with higher levels in Ya'an, Mianyang, and Guangyuan City and lower levels in

收稿日期: 2024-07-29

修回日期: 2024-09-27

资助项目: 四川省地质调查研究院重大专项“实景三维在自然资源统一确权登记中的应用研究”(SCIGS-CZDXM-2023005); 四川省自然资源厅项目“大熊猫国家公园自然资源统一确权登记项目(四川片区)”(CM2023CH048)

第一作者: 徐亚莉(1998—), 女(汉族), 四川省渠县人, 硕士, 助理工程师, 主要从事遥感与生态环境的研究工作。Email: yalixuu@163.com。

通信作者: 田苗(1986—), 男(汉族), 重庆市开县人, 高级工程师, 主要从事测绘地理信息与森林规划管理的研究工作。Email: 290337997@qq.com。

Aba Prefecture and Deyang City. ③ The forest water conservation amount mainly concentrated in areas with altitudes ranging between (1 500, 3 500] meters, contributing 90.10% to the total water conservation amount. In addition, the forest water conservation per unit area significantly decreased as altitude increased ($p < 0.01$). ④ Forests on steep slopes ($35^\circ, 45^\circ$] had the highest forest water conservation amount, with a contribution rate of 24.01%. The forest water conservation per unit area showed a trend of first increasing and then decreasing as slope steepness increased ($p < 0.01$). [Conclusion] Reasonably adjusting the forest resources' structure and optimizing forest resources' distribution of Giant Panda National Park in Sichuan Province according to local conditions would help maximize the forest water conservation function in this area.

Keywords: forest water conservation function; Giant Panda National Park; integrated storage capacity method

近半个世纪以来,水资源、水灾害、水环境和水生态问题严重制约着中国社会经济可持续发展。在此背景下,森林生态系统水源涵养功能的量化、评价及成果推广等备受重视。森林的水源涵养功能指森林通过林冠层、枯落物层及土壤层的相互作用,对降水进行拦截、吸收、储存和缓慢释放的能力^[1]。其主要表现在供给水源,保持水土,拦蓄洪水,调节径流等方面。此外,在改善河流水文水质、促进大气水分循环、调节局地气候等方面也发挥着重要作用^[2]。通过对森林生态系统水源涵养功能进行科学评价,可有效指导森林保护、水资源利用以及区域规划等,同时为水源涵养林建设与管理提供理论支撑。

森林水源涵养功能的评价方法众多,如林冠截留剩余量法^[3]、土壤蓄水能力法^[4]、地下径流增长法^[5]、降水储存量法^[6]、多因子回归法^[7]、水量平衡法^[8]、综合蓄水能力法^[9]等。这些方法各有优劣,前 4 种方法由于对森林水源涵养的内涵和机理缺乏深入理解,与实际水源涵养过程存在较大偏差,仅在研究早期较为常用;多因子回归法较为全面,但由于需要的参数较多,较难推广应用,且在空间异质性较强的地区,其评价精度不高;水量平衡法较为准确,但蒸散发数据难以准确测定;综合蓄水能力法虽忽略了蒸散发的影响,但便于比较分析不同蓄水层的水源涵养功能强弱,且能反映森林水源涵养量的理论最大值,是一种较理想的评价方法,已被众多学者应用。如孙清琳等^[10]、李双权等^[11]通过收集与统计相关参数,从林冠层、枯落物层及土壤层 3 个水文作用层出发,分别对浙江云和县、长江上游等地区的森林水源涵养功能进行了评估。

大熊猫国家公园(四川片区)地处全球生物多样性保护重点地区、中国生态安全战略格局“两屏三带”关键区域^[12],系长江上游重要的水源涵养地、黄河上游重要的水源补给区。该区森林在 20 世纪 50 至 70 年代经历了大规模的采伐,森林植被和生态环境遭到严重破坏,随后在退耕还林/还草、天然林保护工

程、水土保持和土地综合整治等一系列生态修复工程的推动实施下,该区森林生态服务功能得到一定程度恢复。但受“5·12”汶川地震影响,叠加近年气候变化、火灾、病虫害等的频繁干扰,该区森林生态功能恢复缓慢。目前,大熊猫国家公园的研究主要集中在植被时空变化^[13]、生态安全^[14]、聚落景观多样性^[15]等方面,针对森林水源涵养功能的评价研究尚未见报道,该区森林恢复过程中水源涵养功能的变化机制及空间分布特征尚不明确。

本研究以大熊猫国家公园(四川片区)为研究对象,结合片区森林资源专项调查成果、野外样地实测数据、文献参数数据以及多源遥感数据,采用综合蓄水能力法计算森林林冠层、枯落物层及土壤层的水源涵养功能,明确其空间分布特征,并探讨不同森林类型、海拔及坡度下森林水源涵养功能的差异,以期提升对片区森林水源涵养功能空间格局及形成机制的认识,并为区域森林资源保护,水资源适应性经营管理提供科学依据,助力四川省森林“水库、碳库、钱库、粮库、基因库”建设。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大熊猫国家公园(四川片区)主要分布在卧龙及周边的邛崃山系、大小相岭和岷山山系($102^\circ 11' - 105^\circ 34' E, 28^\circ 51' - 33^\circ 13' N$),区划面积 19 339 km²,其中核心保护区 13 244 km²,一般控制区 6 095 km²,涉及成都、雅安、绵阳、德阳、眉山、广元、阿坝 7 个市(州)共 20 个县(市、区)(图 1)。该区地处松潘—甘孜褶皱系与秦岭褶皱系的交界地带,地势西北高、东南低,地形呈山大峰高、河谷深切、高差悬殊、地势崎岖等特点^[16],海拔高度为 587~6 106 m,平均海拔为 2 755 m,坡度介于 $0^\circ \sim 83^\circ$ 之间,平均坡度为 30° 。该区属亚热带季风气候,年降水量在 500~1 200 mm 之间,年平均气温 $10^\circ C$ 左右^[16]。据统计,研究区现

有森林面积约 16 098 km², 森林覆盖率达 83.24% (图 2)。其中, 以冷杉 (*Abies fabri*)、云杉 (*Picea asperata*)、柳杉 (*Cryptomeria japonica*)、柏木 (*Cupressus funebris*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华山松 (*Pinus armandi*) 等为主的常绿针叶林分布最广, 占片区森林总面积的 39.19%; 以楠木 (*Phoebe zhenman*)、樟木 (*Cinnamomum camphora*)、桉树 (*Eucalyptus robusta*)、栎类 (*Quercus*) 等为主的常绿阔叶林次之, 占片区森林总面积的 24.08%; 其次依次为以桦树 (*Betula*)、椴树 (*Tilia tuan*)、杨树 (*Populus*) 等为主的落叶阔叶林 (20.85%)、灌木林 (14.64%)、竹林 (1.12%); 针阔混交林分布面积最少 (0.12%)。

边样地实测参数和文献收集参数^[17-23]融合得到 (表 1)。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

1.3.1 样地水源涵养功能参数测定 本研究中各森林类型枯落物层及土壤层的水源涵养功能参数来源于 2019—2022 年在研究区内部及周边布设样地所得的实测参数 (表 1)。部分样地虽未完全位于研究区内部, 但其地理条件、生态环境和森林类型与本研究区高度一致, 经过严格的筛选和验证, 其具备较高的代表性和可靠性, 适用于本研究。各海拔带累计布设 20 m × 20 m 的一级样地 45 个, 其中常绿针叶林 13 个, 常绿阔叶林 8 个, 落叶阔叶林 9 个, 针阔混交林 10 个, 灌木林 2 个, 竹林 3 个。

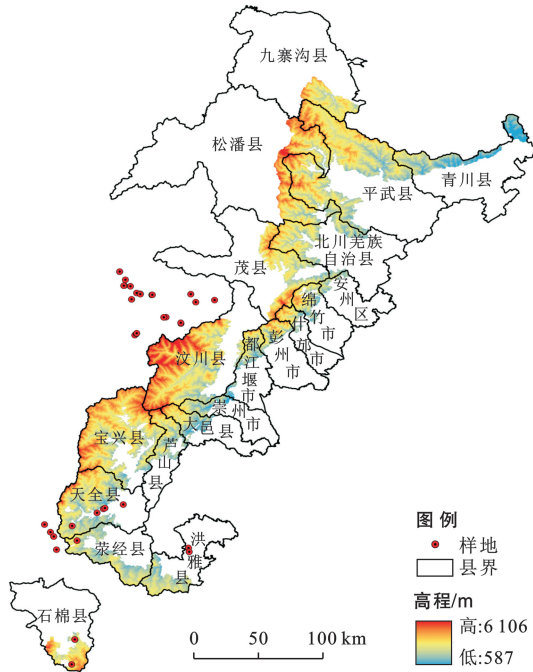


图 1 大熊猫国家公园 (四川片区) 地形图及样地布设
Fig.1 Topographic map and sample plot layout of Giant Panda National Park in Sichuan Province

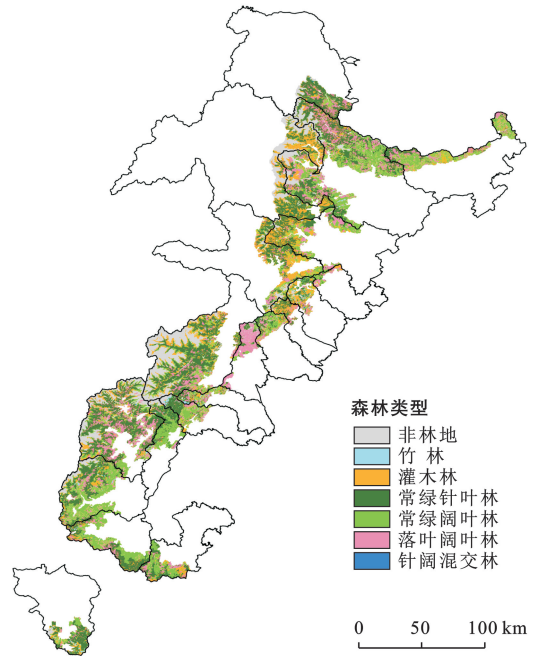


图 2 大熊猫国家公园 (四川片区) 森林类型分布
Fig.2 Distribution of forest types of Giant Panda National Park in Sichuan Province

1.2 数据收集与处理

本文使用的数据包括研究区森林覆盖数据、DEM 数据、降水数据、土壤厚度数据以及各森林类型的水源涵养功能参数数据。研究区森林覆盖数据来源于大熊猫国家公园 (四川片区) 登记单元地籍调查—森林资源专项调查成果, 经对各林地主要树种进行分类合并处理得到。DEM 数据来源于地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>), 并经 ArcGIS 软件处理生成研究区坡度数据。降水数据由美国国家气候数据中心下载的四川省内气象站点数据经 ANUSPLIN 软件插值得到。土壤厚度数据下载自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>)。研究区各森林类型的水源涵养功能参数则由研究区周

表 1 大熊猫国家公园 (四川片区) 不同森林类型的水源涵养功能估算参数

Table 1 Parameters for calculating water conservation function of different forest types of Giant Panda National Park in Sichuan Province

森林类型	林冠截留率/ %	枯落物最大持水量/ (m ³ · hm ⁻²)	土壤非毛管 孔隙度/%
常绿针叶林	30.98	21.40	14.74
常绿阔叶林	25.47	11.30	12.47
落叶阔叶林	21.60	17.86	13.07
针阔混交林	25.92	22.77	13.70
灌木林	20.70	12.25	7.52
竹林	18.83	14.16	6.70

注: 林冠截留率为文献收集参数 (选择与本研究区地理环境和气候条件相近的文献进行收集); 枯落物最大持水量、土壤非毛管孔隙度为样地实测参数。

(1) 样品采集。在各一级样地内分别设置 4 个 50 cm×50 cm 的枯落物样方,收集样方内的地表枯落物及苔藓。同时,在样地内挖取两个土壤剖面,用环刀在 0—10,10—20,20—30 cm 取 3 层原状土壤样本,每层重复取样 3 次。

(2) 指标测定。将采集的各样地枯落物样本装入 1 mm 孔径的筛网,置于清水中浸泡 24 h 后称重(m_{L1} , g),再置于 65 °C 烘箱中烘干至恒重(m_{L0} , g)。土壤持水特性使用环刀法测定,将装有土壤样本的环刀置于清水中浸泡 12 h 后称重(m_{s1} , g),然后置于干砂上 2 h 并称重(m_{s2} , g),最后将环刀土壤置于烘箱中烘干至恒重(m_{s0} , g)。枯落物最大持水量(β)及土壤非毛管孔隙度(γ)的计算公式为:

$$R_m = \frac{m_{L1} - m_{L0}}{m_{L0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$M_L = m_{L0} / A_L \quad (2)$$

$$\beta = R_m \times M_L \quad (3)$$

$$C_{\text{tot}} = \frac{m_{s1} - m_{s0}}{V} \quad (4)$$

$$C_{\text{cap}} = \frac{m_{s2} - m_{s0}}{V} \quad (5)$$

$$\gamma = C_{\text{tot}} - C_{\text{cap}} \quad (6)$$

式中: R_m 为枯落物最大持水率(%); M_L 为枯落物蓄积量(t/hm^2); A_L 为枯落物采样面积(m^2); C_{tot} 为土壤总孔隙度(%); C_{cap} 为土壤毛管孔隙度(%); γ 为土壤非毛管孔隙度(%); V 为环刀容积(cm^3)。

1.3.2 森林水源涵养功能评价方法 根据研究区实际情况及现有资料数据,本研究采用综合蓄水能力法计算大熊猫国家公园(四川片区)的森林水源涵养量。综合蓄水能力法的具体计算公式为:

$$W = C + L + S \quad (7)$$

式中: W 表示森林总水源涵养量(m^3); C 表示林冠

截留量(m^3); L 表示枯落物最大持水量(m^3); S 表示土壤蓄水量(m^3)。

(1) 林冠截留量。林冠层的截留作用是对降水的首次分配。林冠截留量主要与森林结构(如林分密度、郁闭度、冠幅等)和降雨特征(降雨量、降雨持续时间、降雨强度等)有关^[23]。其计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times P \times A_i \quad (8)$$

式中: α 表示林冠截留率(%); P 表示单次最大降水量(m); A 表示面积(hm^2); i 表示森林类型。

(2) 枯落物最大持水量。枯落物层是调节降水的第 2 个作用层。枯落物层水源涵养功能的大小主要受到森林枯落物有效蓄积量、枯落物最大持水率以及森林面积等因素共同影响。其计算公式为:

$$L = \sum_{i=1}^n \beta_i \times A_i \quad (9)$$

式中: β 表示枯落物最大持水量(m^3/hm^2)。

(3) 土壤蓄水量。土壤层是森林拦蓄降水的最后一个作用层,是森林涵养水源的主要场所^[11]。土壤层蓄水量的大小主要受到土壤厚度和土壤非毛管孔隙度两个因素影响。其计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n \gamma_i \times D_i \times A_i \quad (10)$$

式中: γ 表示土壤非毛管孔隙度(%); D 表示土壤厚度(m)。

2 结果与分析

2.1 森林水源涵养功能林型分异特征

大熊猫国家公园(四川片区)的森林总水源涵养量为 $1.71 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中林冠层截留量为 $1.74 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总量的 10.21%;枯落物层最大持水量为 $2.71 \times 10^7 \text{ m}^3$,占总量的 1.58%;土壤层蓄水量为 $1.51 \times 10^9 \text{ m}^3$,占总量的 88.21%,是森林涵养水源的主要场所(表 2)。

表 2 大熊猫国家公园(四川片区)不同森林类型的水源涵养功能

Table 2 Water conservation function of different forest types of Giant Panda National Park in Sichuan Province

森林类型	林地面积/ (10^2 hm^2)	林冠截留量/ (10^6 m^3)	枯落物最大持水量/ (10^6 m^3)	土壤蓄水量/ (10^6 m^3)	总水源涵养量/ (10^6 m^3)	单位面积水源涵养量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
常绿针叶林	6 309.59	70.72	13.50	649.81	734.03	1 163.36
常绿阔叶林	3 876.26	49.11	4.38	386.53	440.02	1 135.17
落叶阔叶林	3 356.44	34.60	5.99	345.91	386.50	1 151.52
针阔混交林	19.59	0.19	0.04	1.82	2.05	1 046.45
灌木林	2 357.24	18.65	2.89	114.68	136.22	577.88
竹林	179.45	1.11	0.25	8.30	9.66	538.31
合计	16 098.56	174.38	27.06	1 507.04	1 708.49	1 061.27

研究区森林以常绿针叶林、常绿阔叶林和落叶阔叶林为主,针阔混交林分布面积最小。各森林类型中,常绿针叶林的总水源涵养量最高,为 $7.34 \times 10^8 \text{ m}^3$,占森林生态系统水源涵养总量的42.96%;常绿阔叶林和落叶阔叶林的总水源涵养量相当,分别为 $4.40 \times 10^8 \text{ m}^3$, $3.86 \times 10^8 \text{ m}^3$,水源涵养贡献率分别为25.75%,22.62%;竹林和针阔混交林的总水源涵养量最低,仅分别为 $9.66 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0.57%)和 $2.05 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0.12%)(表2)。

研究区各森林类型的单位面积水源涵养量均值为 $1\ 061.27 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,其中常绿针叶林最高,为 $1\ 163.36 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;落叶阔叶林和常绿阔叶林次之,分别为 $1\ 151.52$, $1\ 135.17 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;灌木林和竹林最低,仅分别为 577.88 , $538.31 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (表2和图3)。

2.2 森林水源涵养功能空间分布特征

研究区森林林冠层、枯落物层及土壤层的水源涵

养功能空间分布特征差异较大(图3)。林冠截留量在 $3.99 \sim 346.90 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间,均值为 $108.68 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,其空间分布与降水量较为一致,基本呈现自西南向东北方向递增的格局。枯落物层最大持水量介于 $11.30 \sim 22.77 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间,均值为 $16.81 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,宝兴县、天全县、汶川县、平武县、九寨沟县等地较高($17 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 以上),东部边缘地区较低($12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 以下)。土壤蓄水量在 $0 \sim 1\ 535.12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间,均值为 $936.42 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,形成了以雅安市、绵阳市、广元市等地为代表的高值区($1\ 000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 以上)和以阿坝州、德阳市为主的低值区($800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 以下)的空间分布格局。森林3个层次总水源涵养量介于 $19.97 \sim 1\ 836.21 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间,均值为 $1\ 061.27 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,空间分布与土壤蓄水量相似,雅安市、绵阳市、广元市多维持在 $1\ 100 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 以上,而阿坝州、德阳市则多低于 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

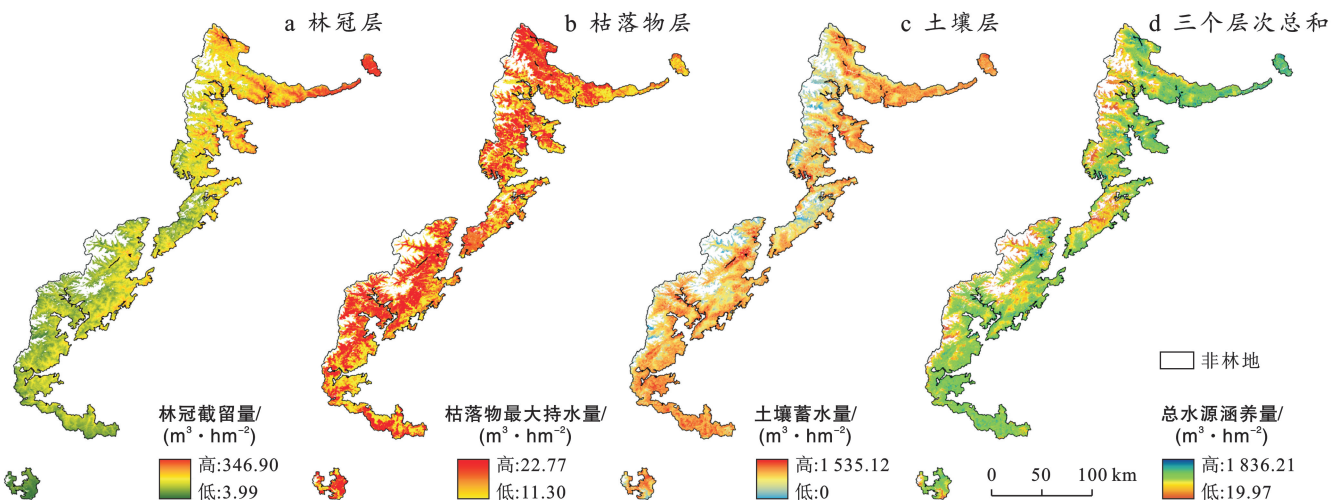


图3 大熊猫国家公园(四川片区)森林水源涵养功能的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of forest water conservation function of Giant Panda National Park in Sichuan Province

2.3 森林水源涵养功能海拔高度分异特征

为研究大熊猫国家公园(四川片区)森林水源涵养功能的海拔高度分异特征,根据研究区森林资源集中分布的海拔高度范围($1\ 500 \sim 3\ 500 \text{ m}$),将研究区划分为 $\leq 1\ 500 \text{ m}$, $(1\ 500, 2\ 000] \text{ m}$, $(2\ 000, 2\ 500] \text{ m}$, $(2\ 500, 3\ 000] \text{ m}$, $(3\ 000, 3\ 500] \text{ m}$ 及 $> 3\ 500 \text{ m}$ 6个高度带,分别统计各海拔高度带的森林面积及水源涵养量。结果表明(图4),研究区森林水源涵养总量主要集中在海拔高度($1\ 500, 3\ 500] \text{ m}$)地区,其森林面积占比和水源涵养量累积贡献率分别达87.47%,90.10%。其中,高度($2\ 000, 2\ 500] \text{ m}$)地区的森林水源涵养量最高,贡献率为29.10%;高度($2\ 500, 3\ 000] \text{ m}$)地区次之,贡献率为26.49%;高度($1\ 500, 2\ 000] \text{ m}$)

和($3\ 000, 3\ 500] \text{ m}$)地区的森林水源涵养量较为接近,贡献率分别为19.48%和15.03%;高度 $\leq 1\ 500 \text{ m}$ 和 $> 3\ 500 \text{ m}$ 地区的森林水源涵养量则较低,贡献率仅分别为6.06%和3.83%。此外,随着海拔高度的升高,研究区森林单位面积水源涵养量呈显著的下降趋势($p < 0.01$),由 $1\ 317.40 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 逐渐下降至 $532.16 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

2.4 森林水源涵养功能坡度分异特征

依据现行《森林资源规划设计调查技术规程》(GB/T26424—2010),将研究区坡度划分为平坡($0^\circ, 5^\circ$],缓坡($5^\circ, 15^\circ$],斜坡($15^\circ, 25^\circ$],陡坡($25^\circ, 35^\circ$],急坡($35^\circ, 45^\circ$)和险坡($> 45^\circ$)6个级别,统计各坡度级别的森林面积及水源涵养量。结果表明(图5),研究

区各坡度级别的森林总水源涵养量与森林面积成正比,急坡(35° , 45°]地区的森林面积和总水源涵养量均最高(比例约 24%),其次依次为险坡($>45^{\circ}$)地区(21%左右)、陡坡(25° , 35°]地区(18%左右)、平坡(0° , 5°]地区(16%左右)、斜坡(15° , 25°]地区(11%左右),缓坡(5° , 15°]地区最低,比例不足 10%。此外,在 $[0^{\circ}$, 25°]坡度范围内,森林单位面积水源涵养量随着坡度的增加呈显著的上升趋势($p < 0.01$);而在坡度超过 25° 时,森林单位面积水源涵养量则显著下降($p < 0.01$)。

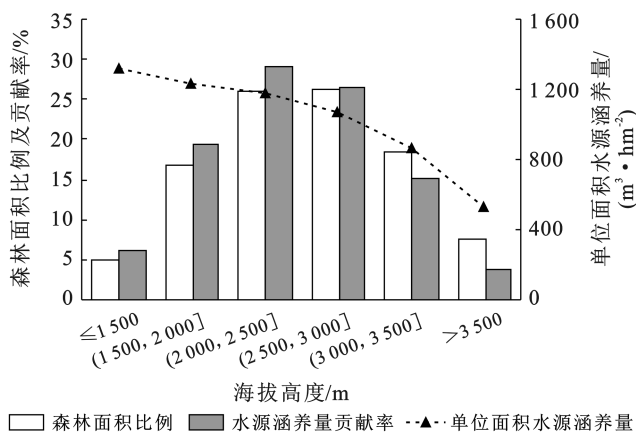


图 4 大熊猫国家公园(四川片区)不同海拔的森林水源涵养功能
Fig.4 Forest water conservation function at different altitudes of Giant Panda National Park in Sichuan Province

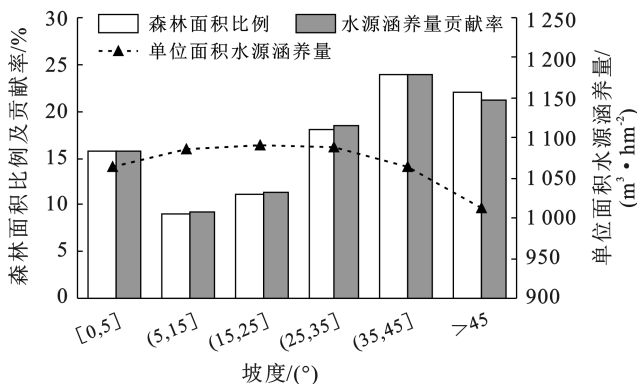


图 5 大熊猫国家公园(四川片区)不同坡度的森林水源涵养功能
Fig.5 Forest water conservation function at different slopes of Giant Panda National Park in Sichuan Province

3 讨论

3.1 不同森林类型的水源涵养功能特性

本研究表明,森林土壤层对降水分配的影响最为关键,林冠层次之,枯落物层最低,与已有研究结论一致^[23-24]。就单位面积水源涵养量而言,各森林类型表现为常绿针叶林最高、落叶阔叶林次之、灌木林和竹林最低,与刘璐璐等^[25]的研究结果类似。研究区常

绿针叶林主要由云杉、冷杉等树种组成,其林龄大,根系发达,土壤有机质丰富,对土壤容重、孔隙度等物理性质的改良作用最为明显^[26],因此其单位面积水源涵养量最高。落叶阔叶林因地被物较厚、凋落物腐殖化程度较高,对减缓土壤蒸发和改善林地土壤理化性质作用明显,单位面积水源涵养量仅次于常绿针叶林。灌木林多分布于高海拔地区,受气候条件影响,林地郁闭度低、枯落物少,土壤结构易受侵蚀^[27],其单位面积水源涵养量相对较低。竹林林型结构单一,林下土层浅薄且土壤板结程度较高,导致其单位面积水源涵养量最低。森林总水源涵养量受单位面积水源涵养量和林地面积两个因素共同影响。常绿针叶林因分布面积和单位面积水源涵养量均最高,其总水源涵养量亦最高。常绿阔叶林虽单位面积水源涵养量略低于落叶阔叶林,但其林地面积较后者高 15.49%,导致总水源涵养量高于落叶阔叶林。针阔混交林的单位面积水源涵养量虽较高,但林地面积占比极小(仅 0.12%),因此其总水源涵养量最低。

3.2 森林水源涵养功能的空间特征及形成机制

研究区森林水源涵养功能的空间差异主要与自然地理环境和人为因素有关。气候条件的空间异质性和垂直地带性使不同地区、不同海拔带的水热状况各异,从而在空间上形成不同的植被、土壤分布格局,加之森林采伐、毁林开荒、城市扩张等人类活动又对森林结构造成深刻影响,从而进一步影响森林的水源涵养功能^[28]。研究区森林林冠截留量主要受降水分布影响,在降水丰富的东北部地区最高,而在降水稀少的西南部地区最低。枯落物最大持水量主要受枯落物最大持水率、蓄积量等因素影响,而这些因素又与林分组成、林龄等因素密切相关^[29]。枯落物持水量较高的地区广泛分布有常绿针叶林和落叶阔叶林,林下易堆积形成较厚的枯落物层;而在东部边缘地区主要分布着常绿阔叶林,林下枯落物含量少,因此持水量低。土壤蓄水量与土壤厚度和非毛管孔隙度有关^[27]。雅安市、绵阳市、广元市等地的土壤厚度多在 80 cm 以上,高于片区平均土壤厚度(73 cm),且这些地区多分布有常绿针叶林、常绿阔叶林和落叶阔叶林,植被根系的穿插可极大程度地改善土壤结构、增加土壤渗透性,从而显著提升土壤蓄水能力;阿坝州、德阳市等地主要分布着灌木林,受海拔和人类活动等因素影响,林地郁闭度低、枯落物少且土壤石砾含量高,导致土壤蓄水量较低。研究区森林土壤蓄水量占森林生态系统水源涵养总量的 88.21%,因此森林 3 个层次的总水源涵养量与土壤蓄水量的空间分布格局基本一致。

地形因子(海拔、坡度等)通过影响水热条件的再分配间接作用于森林的水源涵养功能^[28]。本研究发现,森林单位面积水源涵养量随着海拔的升高呈极显著的下降趋势($p < 0.01$),与乌江上游地区^[23]的研究结论类似,这主要由林区土壤厚度和植被分布的垂直地带性引起。在低海拔($\leq 1\ 500\text{ m}$)地区,落叶阔叶林、常绿阔叶林和常绿针叶林交错分布,林区土壤厚实(均值为 88 cm),植被根系发达,有利于水源涵养;随着海拔的升高,乔木林逐渐向灌木林过渡,且林区土壤厚度减小,在海拔超过 3 500 m 地区,灌木林占比高达 46%,土壤厚度也仅 43 cm,导致此地区单位面积水源涵养量最低。坡度是影响坡面径流量和土壤侵蚀量的重要因子。本研究表明,森林单位面积水源涵养量随着坡度的增加呈先升高后下降的趋势,此结果与吴丹等^[24]在石棉县的研究结果一致,这主要受林区土壤厚度变化影响。在坡度较平缓的 $[0^\circ, 25^\circ]$ 地区,林区土壤厚度逐渐增加,且水源涵养能力强的林地分布面积逐渐增大,导致森林水源涵养能力持续增强并达到其阈值;而在坡度超过 25° 时,土壤流失加剧,加之林木立地困难,生长发育受限,不利于水源涵养,因此森林单位面积水源涵养量逐渐下降。

3.3 研究局限与展望

综合蓄水能力法从森林林冠层、枯落物层及土壤层 3 个层次评价森林的水源涵养功能,其参数较多、考虑较为全面,但此方法未将林冠层、林下植被及土壤等的蒸散发考虑在内,在一定程度上可能高估了森林的水源涵养量^[30]。未来可尝试采用区域水量平衡法、InVEST 模型模拟等多种方法对本研究结论进行交叉验证。同时,受研究条件和资料的局限性,本研究用到的森林水源涵养功能评价参数通过融合研究区周边样地的实测参数和文献收集参数得到,野外实测样地偏少且未完全位于研究区内部,因此评价结果在一定程度上未能很好地反映研究区实际情况。未来可在研究区内部针对各森林类型设计更大密度的野外观测方案,以进一步提升研究结果的准确性。此外,森林植被的空间格局及其结构对生态功能的影响是一个动态变化的过程,本研究仅基于近三四年的观测数据,若要全面了解研究区森林水源涵养功能的时空变化特征,未来还需在实地开展连续定位观测。

4 结论

(1) 大熊猫国家公园(四川片区)森林生态系统的水源涵养总量为 $1.71 \times 10^9\text{ m}^3$,森林单位面积水源涵养量为 $1\ 061.27\text{ m}^3/\text{hm}^2$,土壤层是森林涵养水源的主要场所,常绿针叶林的水源涵养功能最强。

(2) 森林水源涵养功能的空间差异较为明显,林冠截留量的空间分布受次降水量影响较大,呈自西南向东北方向递增的空间分布格局;枯落物最大持水量在宝兴、天全、汶川、平武及九寨沟等地较高,而在研究区东部边缘地区较低;土壤蓄水量与森林 3 个层次总的水源涵养量则形成了雅安市、绵阳市、广元市等地较高,阿坝州、德阳市等地较低的空间分布格局。

(3) 森林水源涵养总量主要集中在海拔(1 500, 3 500] m 的地区,其水源涵养贡献率达 90.10%,其中海拔(2 000, 2 500] m 地区的森林水源涵养量最高(29.10%);森林单位面积水源涵养量随着海拔的上升呈显著的下降趋势($p < 0.01$)。

(4) 坡度大于 25° 地区的森林总水源涵养量贡献率达 63.56%,其中急坡($35^\circ, 45^\circ$]地区的森林总水源涵养量最高(24.01%);森林单位面积水源涵养量随坡度的增加呈显著的先升高后下降的趋势($p < 0.01$)。本研究结论有助于提升对大熊猫国家公园(四川片区)森林生态系统水源涵养功能的空间差异及其作用机制的认识,并为制定更为科学、合理的森林资源保护和水资源管理策略提供理论依据和数据支持。

参考文献(References)

- [1] 李佳,邵全琴,刘纪远.基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算:以江西兴国县为例[J].西北林学院学报, 2012, 27(4): 83-87.
Li Jia, Shao Quanqin, Liu Jiyuan. Forest conservation estimation based on the integrated storage capacity method: A case study of Xingguo County in Jiangxi [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 83-87.
- [2] 王云飞,叶爱中,乔飞,等.水源涵养内涵及估算方法综述[J].南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(6): 1041-1071.
Wang Yunfei, Ye Aizhong, Qiao Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(6): 1041-1071.
- [3] 邓坤枚,石培礼,谢高地.长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J].资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
Deng Kunmei, Shi Peili, Xie Gaodi. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits [J]. Resources Science, 2002, 24(6): 68-73.
- [4] 马雪华.森林水文学[M].北京:中国林业出版社, 1993: 123-128.
Ma Xuehua. Forest hydrology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 123-128.
- [5] 侯元兆,张颖,曹克瑜.森林资源核算(上卷)[M].北京:中国科学技术出版社, 2005: 51-56.

- Hou YuanZhao, Zhang Ying, Cao Keyu. Accounting of forest resources (Upper Volume) [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2005:51-56.
- [6] 张三焕,赵国柱,田允哲,等.长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究[J].延边大学学报(自然科学版),2001,27(2):126-134.
- Zhang Sanhuan, Zhao Guozhu, Tian Yunzhe, et al. Study on value the ecological environment valuation of forestry resources: For case by Hunchun forestry in Changbai Mountain [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2001,27(2):126-134.
- [7] 张庆费,周晓峰.黑龙江省汤旺河和呼兰河流域森林对河川年径流量的影响[J].植物资源与环境,1999,8(1):22-27.
- Zhang Qingfei, Zhou Xiaofeng. Influence of forest on runoff discharges in Tangwang River and Hulan River basins of Heilongjiang Province [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1998,8(1):22-27.
- [8] 肖寒,欧阳志云,赵景柱,等.森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探:以海南岛尖峰岭热带森林为例[J].应用生态学报,2000,11(4):481-484.
- Xiao Han, Ouyang Zhiyun, Zhao Jingzhu, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000,11(4):481-484.
- [9] 郎奎建,李长胜,殷有,等.林业生态工程10种森林生态效益计量理论和方法[J].东北林业大学学报,2000,28(1):1-7.
- Lang Kuijian, Li Changsheng, Yin You, et al. The measurement theory and method of 10 forest ecological benefits for forestry ecological engineering [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000,28(1):1-7.
- [10] 孙清琳,李延森,郭继凯,等.云和县森林生态系统水源涵养功能评估[J].北京大学学报(自然科学版),2015,51(5):888-896.
- Sun Qinglin, Li Yansen, Guo Jikai, et al. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Yunhe County, Zhejiang Province [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015,51(5):888-896.
- [11] 李双权,苏德毕力格,哈斯,等.长江上游森林水源涵养功能及空间分布特征[J].水土保持通报,2011,31(4):62-67.
- Li Shuangquan, Sudebilig, Hasi, et al. Water conservation function of forest ecosystem and its spatial distribution characteristics in upper reaches of the Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(4):62-67.
- [12] 杨渺,周琳,齐敦武,等.大熊猫国家公园(四川片区)景观多样性与物种多样性的关联性研究[J].热带生物学报,2022,13(2):112-119.
- Yang Miao, Zhou Lin, Qi Dunwu, et al. Relationship between landscape diversity and species diversity in Sichuan area of Giant Panda National Park [J]. Journal of Tropical Biology, 2022,13(2):112-119.
- [13] 张晓莹,何毅,赵蕾.2000—2020年我国五大国家公园植被覆盖时空变化特征[J].自然保护地,2023,3(3):11-27.
- Zhang Xiaoying, He Yi, Zhao Lei. The spatial-temporal variation characteristics of vegetation coverage in five national parks from 2000 to 2020 [J]. Natural Protected Areas, 2023,3(3):11-27.
- [14] 秦青,刘晶茹,于强,等.四川省大熊猫保护地生态安全及其时空演变[J].生态学报,2020,40(20):7255-7266.
- Qin Qing, Liu Jingru, Yu Qiang, et al. Ecological security and spatio-temporal evolution of giant panda protected areas in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(20):7255-7266.
- [15] 庞鑫,王雨欣,孙松林.大熊猫国家公园周边地区的聚落景观多样性及其演变趋势:以四川岷山片区为例[J].自然保护地,2024,4(1):42-57.
- Pang Xin, Wang Yuxin, Sun Songlin. Diversity and evolution trends of settlement landscape in the surrounding areas of Giant Panda National Park: A case study of Minshan district, Sichuan Province [J]. Natural Protected Areas, 2024,4(1):42-57.
- [16] 何柳燕,李春容,谭小昱,等.大熊猫国家公园邛崃山—大相岭片区景观格局动态变化[J].四川林业科技,2023,44(2):21-30.
- He Liuyan, Li Chunrong, Tan Xiaoyu, et al. Dynamic changes of landscape pattern in Qionglai Mountain-Daxiangling area of Giant Panda National Park [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2023,44(2):21-30.
- [17] 张文广,胡远满,张晶,等.岷江上游地区近30年森林生态系统水源涵养量与价值变化[J].生态学杂志,2007,26(7):1063-1067.
- Zhang Wenguang, Hu Yuanman, Zhang Jing, et al. Forest water conservation and its benefits in upper reaches of Minjiang River in recent 30 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007,26(7):1063-1067.
- [18] 石培礼,吴波,程根伟,等.长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J].自然资源学报,2004,19(3):351-360.
- Shi Peili, Wu Bo, Cheng Genwei, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the Upper Yangtze Basin [J]. Journal of Natural Resources,

- 2004,19(3):351-360.
- [19] 陈东立,余新晓,廖邦洪.中国森林生态系统水源涵养功能分析[J].世界林业研究,2005,18(1):49-54.
Chen Dongli, Yu Xinxiao, Liao Banghong. Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem [J]. World Forestry Research, 2005,18(1): 49-54.
- [20] 程良爽.岷江上游山地森林/干旱河谷交错带不同植被水源涵养效益[D].四川雅安:四川农业大学,2010.
Cheng Liangshuang. The water conservation benefit of different vegetation types in the montane forest-arid valley ecotone in the upper reach of Minjiang River [D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2010.
- [21] 郝奇林.岷江上游亚高山森林林冠截留与枯落物层持水特性的研究[D].江苏南京:南京林业大学,2007.
Hao Qilin. Study on canopy interception and water-holding characteristics of litter layer of subalpine forest in the upper reaches of Minjiang River [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Forestry University, 2007.
- [22] 何常清,薛建辉,吴永波,等.应用修正的 Gash 解析模型对岷江上游亚高山川滇高山栎林林冠截留的模拟[J].生态学报,2010,30(5):1125-1132.
He Changqing, Xue Jianhui, Wu Yongbo, et al. Application of a revised Gash analytical model to simulate subalpine *Quercus aquifolioides* forest canopy interception in the upper reaches of Minjiang River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(5):1125-1132.
- [23] 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[J].地球信息科学学报,2016,18(7):987-999.
Tang Yuzhi, Shao Quanqin. Water conservation capacity of forest ecosystem and its spatial variation in the upper reaches of Wujiang River [J]. Journal of Geo-Information Science, 2016,18(7):987-999.
- [24] 吴丹,邵全琴,王浩然,等.四川省石棉县森林生态系统水源涵养能力研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(5):80-86.
Wu Dan, Shao Quanqin, Wang Haoran, et al. Research on water conservation capacity of forest ecosystems in Shimian County, Sichuan Province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(5):80-86.
- [25] 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[J].地理科学,2016,36(4):603-611.
Liu Lulu, Cao Wei, Shao Quanqin. Water conservation function of forest ecosystem in the Southern and Northern Pan River watershed [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016,36(4):603-611.
- [26] 邓力濠,张明芳,师嘉祺,等.岷江杂谷脑流域典型天然林和人工林林地水文效应研究[J].西南林业大学学报,2021,41(3):45-52.
Deng Lihao, Zhang Mingfang, Shi Jiaqi, et al. Hydrological effect of natural and planted forest stands in the Zagunao watershed of the Minjiang River basin [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2021,41(3):45-52.
- [27] 陈文静,祁凯斌,黄俊胜,等.川西不同树种人工林对土壤涵水能力的影响[J].生态学报,2017,37(15):4998-5006.
Chen Wenjing, Qi Kaibin, Huang Junsheng, et al. Effect of reforestation with different tree species on soil water-holding capacity in Western Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(15):4998-5006.
- [28] 徐亚莉,张明芳,李强,等.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[J].生态学报,2023,43(13):5614-5626.
Xu Yali, Zhang Mingfang, Li Qiang, et al. 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 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(13):5614-5626.
- [29] 杨益帆,胡宗达,李亚非,等.川西亚高山川滇高山栎灌丛地被物与土壤持水性能[J].应用与环境生物学报,2020,26(4):951-960.
Yang Yifan, Hu Zongda, Li Yafei, et al. Water conservation capacity of ground cover and soils in the subalpine *Quercus aquifolioides* shrubs of Western Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020,26(4):951-960.
- [30] 司今,韩鹏,赵春龙.森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J].自然资源学报,2011,26(12):2100-2109.
Si Jin, Han Peng, Zhao Chunlong. Review of water conservation value evaluation methods of forest and case study [J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(12):2100-2109.