

DOI: 10.20103/j.stxb.202404010701

张祯尧, 陈思瑾, 张振明, 余新晓, 夏兵. 北京山区森林生态系统水源涵养功能沿海拔梯度的空间变异. 生态学报, 2025, 45(3): 1239-1250.

Zhang Z Y, Chen S J, Zhang Z M, Yu X X, Xia B. Spatial patterns of forest water conservation function along an elevation gradient in the Beijing mountain area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1239-1250.

北京山区森林生态系统水源涵养功能沿海拔梯度的空间变异

张祯尧^{1,2}, 陈思瑾³, 张振明^{2,*}, 余新晓², 夏兵¹

1 深圳市北林苑景观及建筑规划设计院有限公司博士后工作站, 深圳 518055

2 北京林业大学, 北京 100083

3 甘肃农业大学生命科学技术学院, 兰州 730070

摘要: 水源涵养是森林生态系统服务功能的重要组成部分。对北京鹫峰国家森林公园 150—1150m 海拔范围内 10 个海拔梯度上坡面主要水文过程进行了研究, 发现水源涵养量随海拔升高呈“降-升-降”的变化规律, 在海拔 450m 处最小(55mm), 海拔 750m 处达到最大值(130mm)。水源涵养量在 150—450m 海拔范围内下降的主要原因是以蒸散为主要形式的水分输出在这一海拔区间随海拔升高递增, 蒸散量占降水量的 80%, 在 750—1150m 海拔范围内下降的主要原因是降水输入随海拔升高递减。研究区土壤砾石含量高、降雨集中的特点, 有利于强降水最大限度发生下渗, 土壤水深层渗漏量超过降水量的 20%。水分大量下渗有利于补充地下水、降低强降水引发土壤侵蚀的风险, 但土壤砾石含量过高保水性太差使得水分大量下渗会造成土壤水分亏缺(-1.61%/a)。以海拔变化表征华北地区气候暖干化趋势发现, 未来该区森林生态系统的水源涵养功能有减弱的可能, 水资源短缺造成的生态压力或将进一步提升。

关键词: 海拔梯度; 水量平衡; 生态系统服务; 水源涵养; 土石山区

Spatial patterns of forest water conservation function along an elevation gradient in the Beijing mountain area

ZHANG Zhenyao^{1,2}, CHEN Sijin³, ZHANG Zhenming^{2,*}, YU Xinxiao², XIA Bing¹

1 Postdoctoral Programme of Beilinyuan Landscape and Architecture Planning and Design Institute, Shenzhen 518055, China

2 Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The realization of the forest water conservation function is an important aspect of the ecosystem, contributing to human well-being. Some studies evaluated soil water conservation function based on the soil water storage capacity, while the actual water conservation and water storage capacity often have certain differences. It is not rigorous to directly equate the water conservation function of litter and soil with its maximum water capacity in quantitative analysis. In recent years, it attached great importance to the distinction between the water holding capacity and the water conservation amount of the forest ecosystem in study. In this study, we analyzed the spatial variation of forest ecosystem water holding capacity (maximum water capacity) and actual water conservation along the elevation gradient, and the results showed that the variation patterns were very different. In this study, we selected the Jiufeng national forest park, which has a representative vertical distribution of soil and vegetation in the soil-rock mountain area of north China, as the research site. We took

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(BFUKF202418)

收稿日期: 2024-04-01; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenmingzhang@bjfu.edu.cn

elevation as the main spatial variable, monitored the main hydrological processes at 10 gradients stations within the elevation range of 150—1150m, and concluded that: the water holding capacity of the forest ecosystem basically depends on the water storage capacity of the soil layer (91.89%), which basically shows a monotonous increasing trend with the elevation, while the change of the actual water conservation is complex. Forest ecosystem actual water conservation presented the change of “decrease-increase-decrease”, its decline (89—55mm) in the range of 150—450m is due to the evapotranspiration increase with elevation in this elevation interval, and evapotranspiration accounted for 80% of the precipitation. In the 75—1150m range, the decline in precipitation with increasing elevation is the main reason for the decrease in actual water conservation (from 130 to 88mm) in this elevation interval. The influence rate of the three water conservation layers on surface runoff: soil gravel content (40.59%)>litter volume (37.00%)>leaf area index (30.21%). High soil gravel content and concentrated rainfall in the study area facilitate maximum groundwater recharge, with deep soil water leakage accounting for 20% of the precipitation. Significant water infiltration is beneficial for groundwater replenishment and reduces the risk of soil erosion from heavy rainfall. However, the high gravel content of the soil causes the soil water deficit (-1.61%/a). Decreased soil water availability may limit vegetation growth, and insufficient water supply in the dry season may lead to the lack of ecological base flow in basin. Using elevation change as an indicator of the warming and drying climate trend in North China, we found that the water conservation function of the forest ecosystem in this area may weaken in the future, potentially increasing the ecological pressure from water scarcity.

Key Words: elevation gradient; water balance; ecosystem services; water conservation; soil and rock mountainous area

生态系统服务是指生态系统满足人类福祉所实现的各种作用、效能,与人类社会的可持续发展密切相关^[1]。随着全球气候变暖带来的水资源短缺加剧等问题,与水相关的生态系统服务越来越受到学界关注^[2-3]。森林生态系统是陆地生态系统中面积最大、最重要的自然生态系统,为人类带来供给服务、调节服务及文化服务^[4]。森林生态系统的调节功能主要依靠植被实现,丰富的地表植被及其地下根系除了能防止土壤侵蚀,还能增强土壤的渗透性能,减少水分蒸发,从而抑制水量流失,更在于植被有助于早期生态系统水量的补充以及洪水期地表径流的减缓,同时,可以调节水位、有效保护水源。

水源涵养功能是生态系统服务功能中价值量最高的功能之一^[5-6],其中,森林生态系统的水源涵养力远高于农田和草地生态系统,其水源涵养量占整个陆地生态系统的60%^[7]。森林冠层、枯落物层、土壤层的复层结构共同实现了森林的水源涵养功能。中国森林的冠层截留率大致在4.2%—55.6%^[8],呈现出寒温带-温带-亚热带-热带森林冠层截留率依次增高的基本规律。而在森林生态系统实际的水文过程中,枯落物层和土壤层是森林生态系统实现水源涵养功能的主要表现层,枯落物对降水的截蓄能力与枯落物层厚度(蓄积量)显著相关;土壤容重、孔隙度等物理特征是衡量森林水源涵养功能的基础指标^[9]。

森林生态系统的降水量、林冠截留量、蒸散量、地表产流量、土壤水等决定水源涵养功能的关键水文要素在山区存在显著的时空差异。目前就山区森林生态系统水源涵养功能沿海拔梯度的变异规律已有大量研究,多项基于坡面尺度的研究结果指出华北落叶松林蒸散量整体呈现出低海拔坡段高于高海拔坡段的特征^[10-11],而 Kumagai 等^[12]针对日本柳杉蒸散量沿海拔梯度变化规律的研究结果与此相似;刘军等^[13]通过研究指出影响林分蒸散量的控制因素本身具有海拔差异,土壤含水量和土壤水势是低海拔区林分蒸散量的主要控制因子,而高海拔区是则土壤温度和土壤水势。土壤含水量的动态特征具有极强的空间异质性^[14-16], Zhao 等^[17]认为海拔、降水量、土壤颗粒组成是影响土壤含水量的主导因素。而针对森林生态系统水源涵养功能的异质性研究,一方面集中于单一水源涵养作用主体沿海拔梯度的变异研究,缺乏对多个水源涵养作用主体的整合研究,如张引等^[18]对冀北山地5个海拔梯度油松林枯落物水源涵养功能的研究得出,枯落物持水量随海拔升高先减小后增大;张鑫等^[19]对祁连山排露沟小流域土壤水源涵养功能的研究发现,青海云杉林土壤持水力随海拔升高表现出先增后减的规律,而灌丛土壤持水力则呈现单调递增的变化趋势。而针对多

个水源涵养作用主体的整合研究,更多聚焦于不同森林生态系统^[20]、不同植被类型^[21]间的比较分析,对量化山区森林生态系统水源涵养功能海拔差异的量化研究尚少。

此外,国内外许多学者通过引入模型的方法实现对生态系统水源涵养功能的评估^[22-25],范亚宁等^[26]利用 InVEST 模型的产水量模块,在流域尺度上对秦岭北麓水源涵养功能空间格局进行了探究,指出水源涵养功能的空间异质性是气候、土地利用方式、植被结构及土壤性状综合效应的产物。利用多年平均数据对森林生态系统水源涵养功能进行量化分析缺乏一定的实效性意义^[27],为实现对森林生态系统水源涵养功能更加科学客观的评估,应构建长期、固定的动态观测体系^[28],本研究对位于典型的华北土石山区的鹫峰国家森林公园 10 个海拔梯度上的水文过程和植被特征进行了监测和调研,通过识别华北典型土石山区森林生态系统水量平衡特征及水源涵养功能的空间分布规律,以期在华北气候暖干化背景下对该区森林生态系统水源涵养功能的变化进行预测。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于鹫峰国家森林公园(40°03'46"N,116°05'45"E),该公园地处北京海淀区和门头沟区的交界处,属暖温带季风区半湿润半干旱气候,研究区年平均气温 12℃,夏季最高气温达 40℃,冬季最低气温低至 -19℃,多年平均降水量 600mm 左右。受地理因素和季风的作用,该区域 85% 以上降雨集中在夏季,且夏季发生暴雨的频率很高。研究区海拔范围为 134—1059m,土壤随海拔升高由褐土型耕作土、淋溶褐土为主的类型向棕壤为主的类型过渡,中低山土壤、植被垂直分布规律显著。

1.2 研究方法

1.2.1 样点布设

以海拔 150m(鹫峰公园入口)为基准面,海拔高度每升高 100m 选取 2 个典型样点(阴坡、阳坡各 1 个),直至海拔 1050m 处(萝芭地北尖),共计 20 个样点(图 1)。树木的优势种和林分结构随海拔梯度的演替发生转换(表 1)。在 2018 和 2019 两年对每个样点的坡面主要气象和水文要素进行实时监测,记录频次 30min/次,包括降雨量、林内穿透雨量、树干流量、地表径流量、土壤含水量以及土壤水深层渗漏量,监测设备照片见图 1,监测样点的分布情况见表 2。

表 1 不同海拔梯度林分结构因子变化

Table 1 Stand structure along elevation gradients

海拔 Elevation/m	叶面积指数 Leaf area index	密度 Density/(株/hm ²)	优势树种 Dominant tree species	优势树种重要值 Important value
150—250	1.15	443	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> Linn	0.28
250—350	2.26	568	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.3
350—450	2.62	1010	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	0.3
450—550	2.97	1348	五角枫 <i>Acer mono</i>	0.32
550—650	3.80	1753	侧柏	0.32
650—750	4.13	2444	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.41
750—850	3.15	1870	栓皮栎	0.34
850—950	1.26	989	油松	0.36
950—1050	2.75	427.5	落叶松 <i>Larix principis</i>	0.56
1050—1150	2.49	659	落叶松	1

1.2.2 固定监测

在每块样点布设了林内降雨收集装置和树干流收集装置,每块样点采用一个长 10m 直径 60cm 的 PVC 管做承雨槽,由于 PVC 管截面积较大,能较全面地反映林内穿透雨的实际状况。在每块样点具有代表性的标

准木 3 株,采用缠绕橡胶管法测量树干径流。承雨槽及树干橡胶管下接 RG3-M 翻斗式自记雨量筒,雨量筒分辨率为 0.2mm。

表 2 样点信息表

Table 2 Sample point information

样点 Sampling point	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation/m	坡向 Slope orientation	坡度 Slope/(°)
A1 ⁽¹⁾	40°3.692'N 116°5.609'E	200	阳坡	15
B1 ⁽²⁾	40°3.522'N 116°5.232'E	199	阴坡	25
A2	40°3.691'N 116°5.615'E	297	阳坡	22
B2	40°3.523'N 116°5.243'E	303	阴坡	20
A3	40°3.694'N 116°5.611'E	410	阳坡	17
B3	40°3.511'N 116°5.244'E	413	阴坡	19
A4	40°3.674'N 116°5.612'E	502	阳坡	27
B4	40°3.511'N 116°5.245'E	511	阴坡	25
A5	40°3.694'N 116°5.613'E	600	阳坡	21
B5	40°3.511'N 116°5.246'E	604	阴坡	19
A6	40°3.694'N 116°5.613'E	698	阳坡	16
B6	40°3.511'N 116°5.247'E	702	阴坡	19
A7	40°3.694'N 116°5.615'E	800	阳坡	31
B7	40°3.511'N 116°5.235'E	808	阴坡	27
A8	40°3.694'N 116°5.616'E	903	阳坡	17
B8	40°3.511'N 116°5.249'E	897	阴坡	21
A9	40°3.694'N 116°5.617'E	1006	阳坡	25
B9	40°3.511'N 116°5.250'E	999	阴坡	27
A10	40°3.694'N 116°5.618'E	1099	阳坡	21
B10	40°3.511'N 116°5.251'E	1105	阴坡	25

(1) A1—A10;位于阳坡的样点;(2) B1—B10;位于阴坡的样点

在每块样点布设了一台 5TE 土壤水分监测装置,并配备 EM50 数据采集器,实时监测各土层(0—20, 20—40, 40—60cm)土壤含水量,并采用土钻法于生长季期间每月的上、中、下旬,对每块样点各采集一次土样,用烘干法测定含水量,用以监测数据的校准。

在每块样点分别布设一个地表径流和土壤水深层渗漏监测装置,地表径流测定采用自制的规格为 2m×1m 的小型径流场,下接自记雨量筒,土壤水深层渗漏测定采用自制的直径 60cm 高 80cm 的圆筒,在筒中分层填充样点原状土(土深 60cm),下接自记雨量筒,实时监测各样点的地表产流量和深层渗流量。

1.2.3 样地调查

于 2018 年和 2019 年生长季每月的上、中、下旬,利用 LAI-2200c 植物冠层分析仪测定每个样点的叶面积指数(LAI)。于每个样点挖取土壤剖面 3 个,根据剖面土壤发生分层情况用环刀在各土层中部采取原状土样品带回室内。将装有原状土样的环刀称重置水 12h 后称重,计算得出土壤饱和持水量。另将环刀中土样倒入容器中用水洗净,对洗出的砾石进行称重计算得出土壤砾石含量。在每个样点内均匀选取 10 个 1m×1m 的小样方,将未分解层和半分解层的枯落物分别收集,装塑料袋称重,取部分样品装塑料袋密封(防止水分蒸发),带回室内用浸泡法测定枯落物持水量。

1.2.4 指标计算

根据冠层水量平衡计算森林生态系统林冠截留量,计算公式如下:

$$I = P - SF - TF \quad (1)$$

式中, I 为林冠截留量(mm); P 为林外降雨量(mm); TF 穿透雨量; SF 为树干茎流量。林冠截留量作为森林生



图 1 监测设备照片

Fig.1 Photos of monitoring equipment

态系统林冠层持水力;枯落物持水量作为森林生态系统枯落物层持水力;土壤饱和持水量作为森林生态系统土壤层持水力。

根据实测降水量、林冠截留量、土壤含水量、地表径流量及深层渗漏量数据,通过水量平衡方程计算得出林地蒸散量:

$$P = \Delta S + I + R + E + Q \quad (2)$$

式中, P 为降水量(mm); ΔS 为土壤含水量的变化量(mm),当其为正值时表示该时段土壤水分含量增加,为负值时表示该时段土壤水分含量减小; I 为林冠截留量(mm); R 为地表径流量(mm); E 为林地蒸散量(mm),包括乔木蒸腾和林下蒸散; Q 为土壤水与地下水的交换量,本项研究由于监测条件限制,仅考虑了土壤水向深层渗漏补充地下水的情况,未考虑地下水向上补给土壤水的情况,这是本项研究的一个局限性。通常狭义的水源涵养能力可通过水量平衡的计算量化得出,采用水源涵养量来表示,本研究中水源涵养量由降水量减去蒸散量、地表产流量计算得到^[29]。

2 结果分析

2.1 森林生态系统持水力空间格局

森林冠层、枯落物层及土壤层作为森林生态系统水源涵养功能的3大作用主体,在本研究区150—1150m海拔范围内的持水力具体表现为:土壤层(91.89%)>林冠层(6.78%)>枯落物层(1.33%),土壤层持水力远高于林冠层及枯落物层,森林生态系统的持水力基本取决于土壤层的蓄水能力。林冠层、枯落物层及土壤层持水力在各海拔梯度上的具体分布情况见图2。

在150—1150m海拔范围内的阴坡和阳坡,林冠层截留量呈现出相似的变化趋势,总体表现为随海拔的升高呈单峰曲线,在海拔550m处达到最大(17.85mm),在海拔850m处最小(12.96mm)。在450—550m和950—1050m海拔区间上阳坡上的林冠截留量略大于阴坡,其余坡段阴坡上的林冠截留量大于阳坡。在

150—1150m 海拔范围内,森林生态系统林冠截留量的平均值为 15.65mm,不同坡向间,林冠截留量无显著差异($P>0.05$)(图 3)。

在 350—850m 海拔区间上阴坡枯落物持水力显著高于阳坡($P<0.01$)。枯落物持水力随海拔升高呈单峰曲线的变化趋势:在低海拔(150m)最小(1.00—1.10mm),在海拔 650—750m 处最大(3.97—20.74mm)。森林生态系统枯落物持水力的空间格局在 150—1150m 海拔范围内与枯落物蓄积量的分布特征呈现出高度的一致性(图 4),在本研究区森林生态系统枯落物持水力与其蓄积量为显著的正相关关系。

以土壤饱和持水量表征森林生态系统土壤层的持水能力。坡面上各样点土壤饱和持水量在 150—1150m

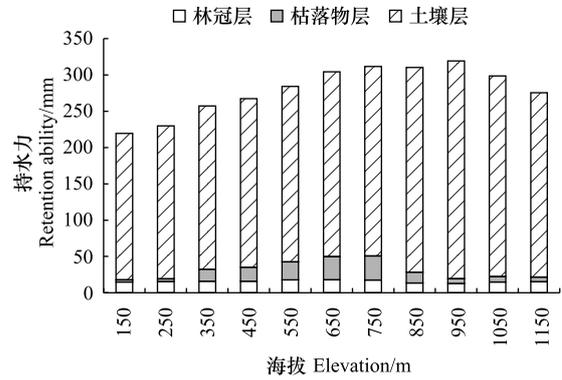


图 2 森林生态系统分层持水力
Fig.2 Retention ability of each layer

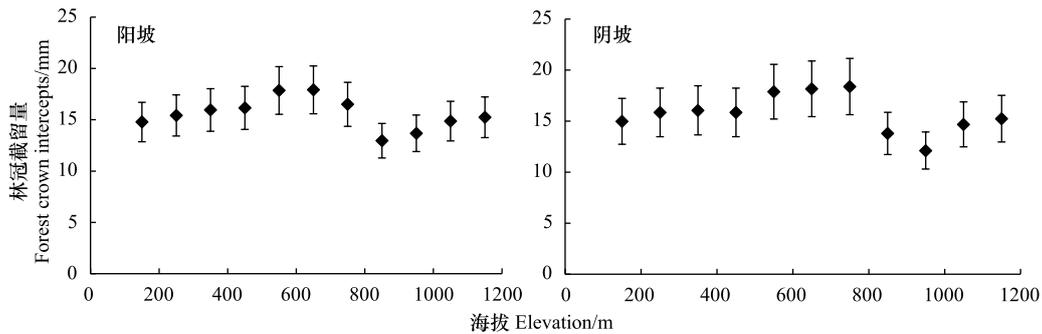


图 3 林冠截留量的空间格局
Fig.3 Spatial pattern of forest crown intercepts

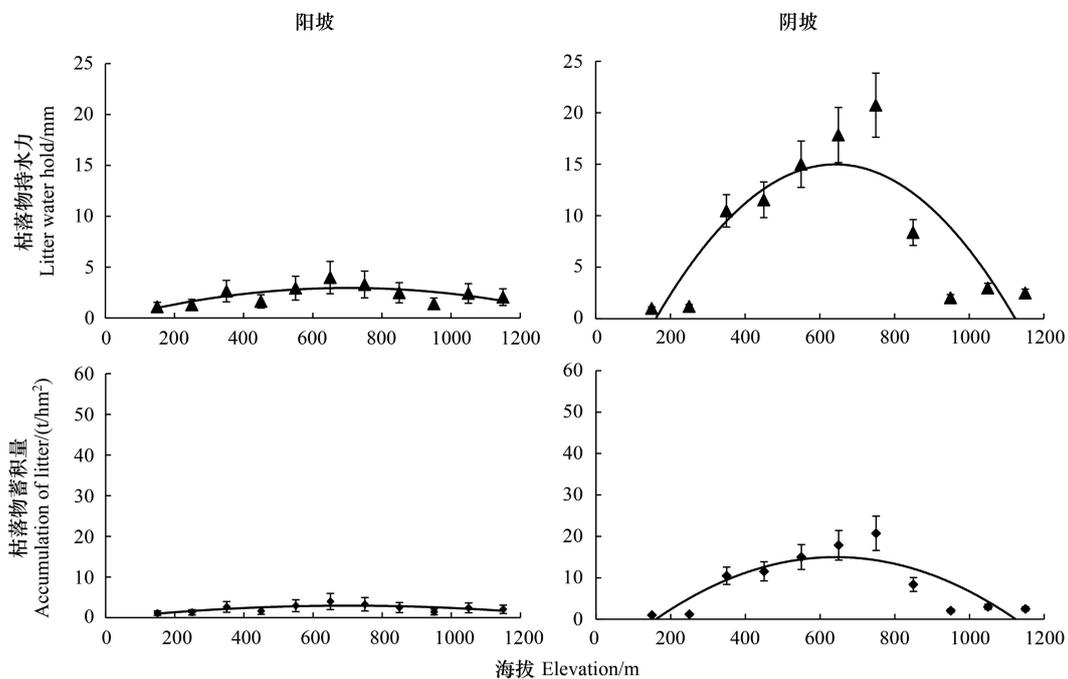


图 4 枯落物持水力-蓄积量的空间格局
Fig.4 Spatial patterns of litter water hold and litter volume

海拔范围内的阴坡和阳坡随海拔升高呈现不同的变化规律,在阳坡上,土壤饱和持水量随海拔的升高呈现单调递增的变化规律,在高海拔(1150m)处达到最大值(61.8%),在低海拔(150m)处最小(39.6%);在阴坡上,随海拔升高呈单峰曲线的变化规律,在海拔 950m 处达到最大(73.8%),在低海拔(150m)处最小(50%)。土壤持水力在 150—1150m 海拔范围内的平均水平表现为:阴坡(58.56%)>阳坡(52.73%)(图 5)。

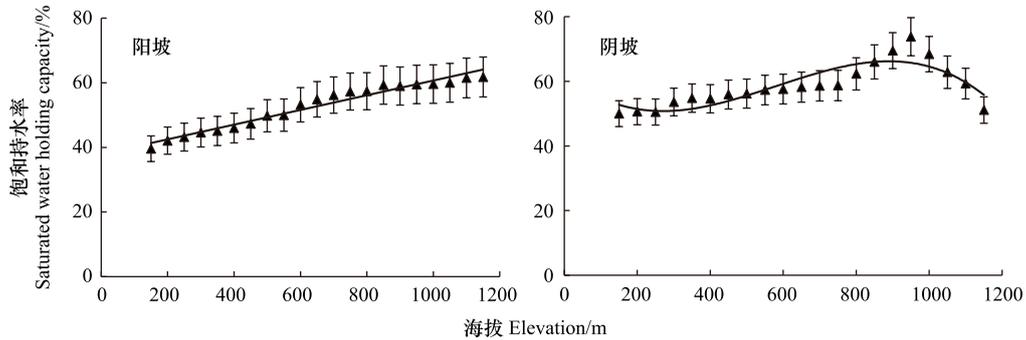


图 5 土壤饱和持水率

Fig.5 Soil saturated water holding capacity

2.2 森林生态系统水源涵养量空间格局

在该研究区随海拔升高,森林生态系统水源涵养量与水源涵养作用主体持水能力的变化规律不同。森林生态系统持水力随海拔升高基本呈现为一个单调递增的趋势,而实际水源涵养量则呈波形变化(图 6)。水源涵养量在 150—450m 和 750m—1150m 海拔区间上出现下降的趋势,其在海拔 450m 处最小(55mm),在海拔 750 m 处达到最大值(130mm)。通过分析可知,这一区域的水源涵养量基本取决于降水量、蒸散量之间的关系,地表产流作为除蒸散以外的水分输出在这一区域极少。在 150—450m 海拔范围内,森林生态系统蒸散量随海拔上升呈增加的趋势,以蒸散为主要形式的森林生态系统水分输出增加是这一海拔区间水源涵养量递减的原因,蒸降比在海拔 450m 处达到最大值(0.89);而在 750—1150m 海拔范围内,降水量随海拔升高而减少,森林生态系统的水分来源减少造成了这一海拔区间水源涵养量的递减,蒸降比在海拔 750m 处最小(0.75)。

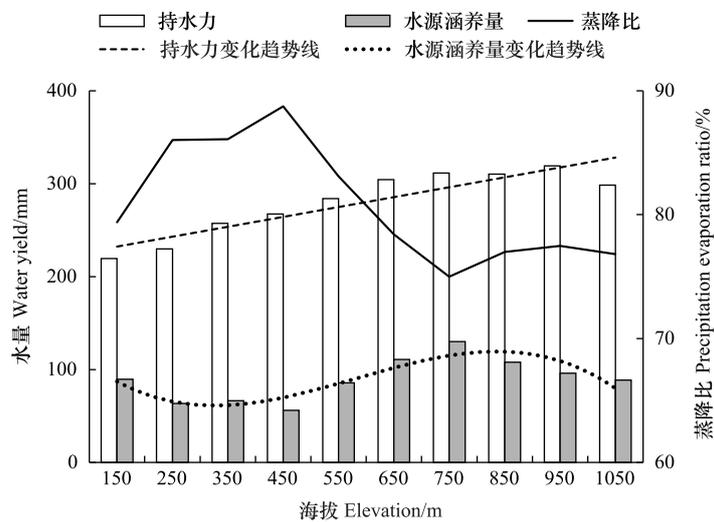


图 6 水源涵养力沿海拔梯度的分布

Fig.6 Spatial pattern of water conservation

2.3 水量平衡分析

作为森林生态系统除蒸散以外的另一水分输出项,2018年和2019年两年研究区共69次降雨仅有4次降雨观测到地表产流,两年平均地表产流量在150—1150m海拔范围内随海拔上升呈现出单峰曲线的变化规律,在海拔850m达到最大(3.05mm),在高海拔(1050m)最小(0.57mm)(图7),地表径流量无显著坡向间差异($P>0.05$)。

森林对降水的截留作用与林冠结构和枯落物层蓄积量、厚度息息相关,同时土壤作为森林涵养水源的主体,其理化性质和结构深刻影响地表径流的产生。为得出不同水源涵养作用主体对地表径流的影响,本研究从林冠叶面积指数、枯落物蓄积量、土壤砾石含量以及海拔四个方面对地表产流的影响进行综合分析。结果表明林冠层、枯落物层、土壤层的结构参数均与地表径流系数呈一定的负相关关系(图8),在枯落物蓄积量较低的时候($<10\text{t}/\text{hm}^2$),地表产流量对蓄积量变化的响应极为敏感。为研究不同的叶面积指数、枯落物蓄积量、土壤砾石含量以及海拔因素对地表径流系数的综合影响,通过广义线性模型计算叶面积指数、枯落物蓄积量、土壤砾石含量以及海拔因素对地表径流系数的效应量,并对计算结果进行主体间效应检验(表3),得出各因素影响地表径流系数的贡献率依次为:土壤砾石含量(40.59%)>枯落物蓄积量(37.00%)>叶面积指数(30.21%)>海拔(4.39%)。海拔因素对地表径流的直接影响较小,在该区域土壤物理性质对地表产流的影响力最大,其次是枯落物层的持水能力,林冠结构对地表产流的影响力最小。

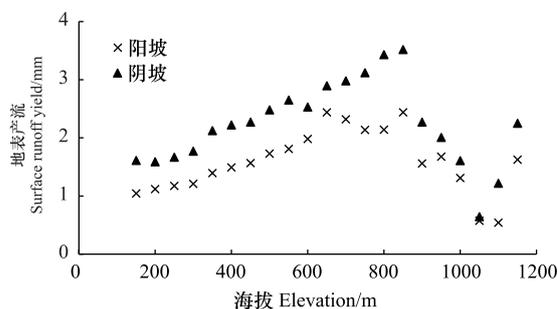


图7 地表径流沿海拔梯度的变化

Fig.7 Changes of surface runoff along elevation gradients

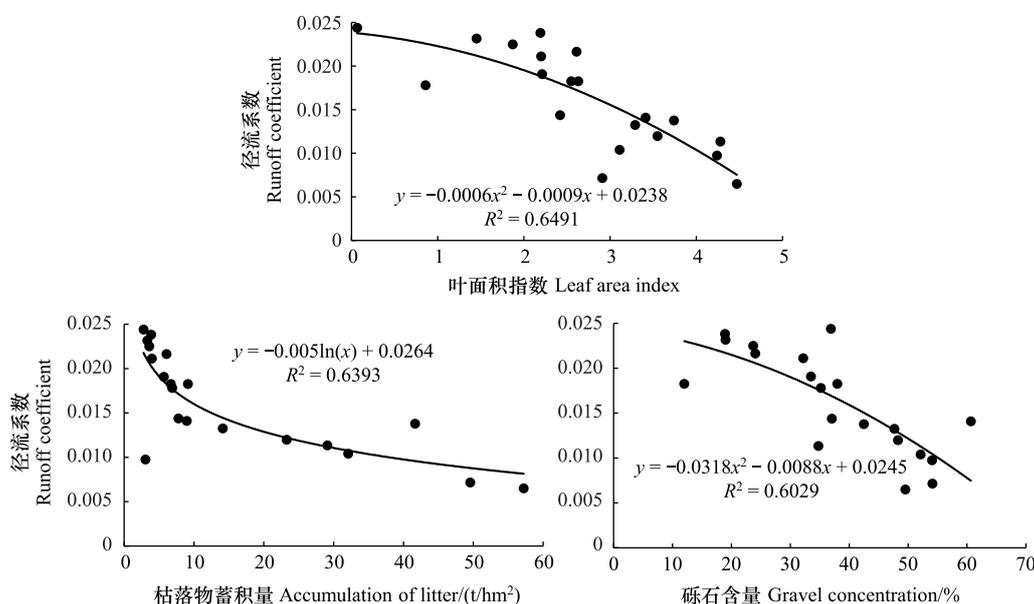


图8 关键参数与径流系数的关系

Fig.8 Relationship between key parameters and runoff coefficient

虽然森林生态系统两年的年平均水源涵养量达到89mm,但作为森林发挥水源涵养作用主体的土壤层,其蓄水量却发生了减少。监测数据显示,相比于2018年生长季初期,研究区2019年生长季末平均土壤含水率下降了3.21%。在150—1150m海拔范围内,土壤蓄水量的减少在海拔750m处最大,而该海拔处蒸降比却是整个海拔区间内的最小值(0.75),且水源涵养量最大(150mm)。在整个海拔区间理论上最湿润的坡段其

土壤蓄水的减量反而最高。通过水量平衡分析得出,在 150—1150m 海拔范围内,以蒸散为主要形式的水分输出占降水量的 80%,土壤水深层渗漏量超过降水量的 20%。由此可见,水源涵养量基本以深层渗漏的形式补充了地下水,深层渗漏水量中还包括了部分土壤蓄水,且土壤水蓄变量与土壤水深层渗漏量在海拔梯度上的分布规律具有高度一致性(表 4)。通过进一步分析可知,深层渗漏量与土壤砾石含量具有较显著的线性正相关关系($R^2 > 0.6, P < 0.05$),这一区域土壤的高砾石含量,通过促进水分入渗阻滞了地表产流,且降水和土壤水的进一步下渗还可补充地下水。另一方面,该区域降水的显著特点是集中度高,85%以上降雨集中在夏季,且极端暴雨的发生频率很高,例如 2016 年发生在北京的“720”暴雨,仅该暴雨事件的累计降雨量就达到了 395.1mm。该土石山区的土壤结构、降水特性,共同造成了坡面地表产流少、深层渗漏量大的水量平衡特征。

表 3 地表产流影响因素的主体间效应检验

Table 3 Inter-subject effect test of influencing factors of surface runoff

源 Source	III 类平方和 Class III square sum	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	<i>F</i> Joint hypotheses test	显著性 Significance	效应量 Effect size
修正模型 Modify model	0.001 _a	4	0	26.467	0	
截距 Nodal increment	0	1	0	90.521	0	
海拔 Elevation	3.43×10^{-6}	1.00	3.43×10^{-6}	0.689	0.42	4.39%
叶面积指数 Leaf area index	3.23×10^{-5}	1.00	3.23×10^{-5}	6.49	0.022	30.21%
枯落物蓄积量 Accumulation of litter	4.38×10^{-5}	1.00	4.38×10^{-5}	8.81	0.01	37.00%
土壤砾石含量 Soil gravel content	5.10×10^{-5}	1.00	5.10×10^{-5}	10.2	0.006	40.59%
误差 Error	7.46×10^{-5}	15.0	4.98×10^{-6}			
总计 Sum	0.006	20				
修正后总计 Sum after correction	0.001	19				

表 4 沿海拔梯度的水量平衡特征

Table 4 The water balance characteristics along an elevation gradient

海拔 Elevation/m	降雨 Precipitation/mm	蒸散量/mm Evapotranspiration	地表径流/mm Runoff	水源涵养量/mm Water conservation	土壤水蓄变量/% Soil water change	深层渗漏量/mm Deep leakage
150	440	349.3	1.3	89.4	1.69	81.8
250	464.8	399.9	1.4	63.5	-0.23	64.5
350	489.6	421.5	1.8	66.3	-0.88	70.3
450	514.4	456.5	1.9	56	-1.25	61.6
550	519.7	431.8	2.2	85.6	1.75	77.8
650	525	411.6	2.7	110.7	1.67	103.2
750	530.4	397.8	2.6	130	-16.23	203
850	482.1	371.2	3	107.9	-12.6	164.6
950	433.8	336.1	1.8	95.9	-2.71	108.1
1050	385.3	296	0.6	88.7	-3.32	103.7

3 讨论

李凯等^[30]通过 3 种模型分别对西南地区森林生态系统的 3 项水源涵养作用主体进行研究,结果表明水源涵养随海拔升高呈单峰曲线的变化规律,在海拔 1000—1500m 达到最大,这与本研究中森林生态系统持水力随海拔升高的变化规律一致,但与实际水源涵养量沿海拔梯度的变化存在一定差异,一方面可能是由于指标的获取方式不同,本研究更侧重于实地监测与调查的方式,另一方面,关于不同时空尺度下水源涵养量的内涵与计算,尚存在一定的讨论余地。有研究基于土壤蓄水能力评价土壤的水源涵养功能特征,是以土壤饱和持水量表征土壤总水源涵养量,以土壤田间持水量表示其有效水源涵养量^[31],而现实情况中土壤的水源涵养

量与其持水能力往往存在一定差异,在对森林水源涵养功能进行量化研究时,不应将枯落物、土壤的水源涵养功能与其最大持水量直接等同^[27],越来越多的研究在对森林水源涵养功能进行分析时,也更加重视将水源涵养作用主体的持水量和水源涵养量做区分,张法伟^[32]对三江源国家公园土壤水源涵养功能的研究将研究指标分为土壤现实储水量(75.2mm)、有效储水量(50.52mm)、水源涵养量(73.89 ± 68.45) mm,研究结果明确表现出三者之间的显著差异;而在本研究中,我们分别分析了森林生态系统持水力(最大持水量)和实际水源涵养量沿海拔梯度的空间变化,结果显示二者的变异规律存在很大差异(图7)。另外,部分研究在对森林水源涵养功能的异质性进行分析时,更多侧重于枯落物层和土壤层水文效应特征而忽略了林冠层的水源涵养作用,在我国林冠层对降水的截留率最大可达到50%以上^[8],因此在表征森林的水源涵养量时,林冠层是不可忽视的作用主体,本研究结果显示在150—1150m海拔范围内各作用主体的持水力具体表现为:土壤层(91.89%)>林冠层(6.78%)>枯落物层(1.33%),而3大作用主体实际的水源涵养量并未得到量化,这是本研究的局限之一,未来应在SPAC系统理论的基础上,加强不同尺度下植被-水文过程的监测和相关反演统计。

我国部分干旱半干旱地区虽出现了降水量上升和植被改善的情况,但在全球变暖的背景下潜在蒸发量增加巨大,远超降水增幅,导致部分地区干旱化更为严重,近三十年来华北地区的气候就呈现出气温升高、降水量减少的暖干化趋势。在本研究中,森林生态系统在由海拔750m向海拔150m过渡的过程中除了伴随着气温升高和降水量减少,这一区间的水源涵养量也出现一定程度的降低,在此以气候由较高海拔区向较低海拔区的过渡表征华北地区近年来的暖干化趋势,未来该研究区森林生态系统的水源涵养功能有减弱的可能,水资源短缺造成的生态压力或将进一步提升。Zhao^[33]研究表明干旱草原生态系统变暖(+2°C)引起的水分亏缺,具体表现在对植被地上生物量和土壤呼吸的影响,需要大于15%的降水增量才能抵消;气候变暖引发的生长季平均蒸散量增加、土壤水分减少,将造成中国南方地区的干旱频率升高,尽管这一区域的平均降水量也有相应程度的增高^[34]。Jaivime^[35]基于全球尺度的研究发现,较湿润地区(干燥指数<1)森林产水量对砍伐后的响应程度低于干旱地区(干燥指数>1),相比于实际蒸散量较低的区域,在实际蒸散量较高的区域实施造林措施会提高森林生态系统产水量,土壤蓄水量、森林生态系统蒸散量是预测区域产水量对森林经营措施响应的关键因素。

全球气候变化会导致森林植被与其生态水文要素的互馈机制发生变化,随之森林生态系统的用水模式也可能发生变化,Everton^[36]对巴西北部的卡廷加森林的研究结果表明,在水资源利用率降低的情况下,森林对水分的利用可能成为以土壤-水脉冲为主的形式;此外,另有研究表明部分树种还可通过叶片吸水的方式抵抗干旱^[37-38]。植物应对干旱胁迫最常见的机制是通过植物根系对水力再分配作用,土壤水可以从湿土层转移到干旱的浅土层,在干旱季节,林木生长水分可以从深层土壤甚至基岩中提取^[39-40]。但这种用水模式,尤其在干旱半干旱地区,可能会加剧地下水位过深的风险。地下水作为全球20多亿人依赖的淡水储备,对缓冲全球变暖对许多区域水资源造成的影响起到至关重要作用^[41],许多干旱和半干旱地区,地下水位过深使得地下水几乎得不到补给^[42]。本研究区土壤砾石含量高、降雨集中的特点,有利于强降水最大限度发生下渗,补充了地下水,且极端降雨事件中鲜有发生的地表产流也大大降低了强降水引发土壤侵蚀的风险;但另一方面,土壤的高砾石含量使得水分大量下渗,旱季供水不足有可能导致流域达不到生态基流,同时土壤水分亏缺有可能造成土壤水分有效性降低,限制植被生长。通过间伐与合理稀植控制造林密度、调整林分结构,不失为解决这一问题的方法之一。

4 结论

(1)在150—1150m海拔范围内,森林生态系统的持水力基本取决于土壤层的蓄水能力(91.89%),其随海拔升高基本呈现为一个单调递增的趋势,而实际水源涵养量的变化则较为复杂,其在海拔450m处最小(55mm),在海拔750m处达到最大值(130mm),水源涵养量在150—450m海拔范围内下降是因为以蒸散为主要形式的水分输出在这一海拔区间随海拔升高递增;在750m—1150m海拔范围内降水量随海拔升高而减少,

森林生态系统的水分来源减少造成了这一海拔区间水源涵养量的递减。

(2)以蒸散为主要形式的水分输出占降水量的 80%,土壤水深层渗漏量超过降水量的 20%,地表产流量极小基本可忽略不计。三大水源涵养作用主体对地表产流的影响率为:土壤砾石含量(40.59%)>枯落物蓄积量(37.00%)>叶面积指数(30.21%)。

(3)研究区土壤砾石含量高、降雨集中的特点,有利于强降水最大限度发生下渗,补充了地下水,且极端降雨事件中鲜有发生的地表产流也大大降低了强降水引发土壤侵蚀的风险;但另一方面,土壤的高砾石含量使得水分大量下渗造成土壤水分亏缺(-1.61%/a),土壤水有效性下降会限制植被生长,旱季供水不足还可能导致流域难达生态基流。

参考文献(References):

- [1] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [2] 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.
- [3] 吕一河,胡健,孙飞翔,张立伟. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [4] 王志刚,王家乐,韩培,杨坤,张超,王可,张平仑. 多重生态服务功能目标下的生产建设项目土壤流失控制值研究——以北京市为例. 水土保持通报, 2022, 42(2): 347-353.
- [5] 王保盛,陈华香,董政,祝薇,邱全毅,唐立娜. 2030年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498.
- [6] 周佳雯,高吉喜,高志球,杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [7] 龚诗涵,肖洋,郑华,肖焱,欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [8] 邓雅丽,赵新宇,崔自杰,冯英杰,张卫强,刘效东. 中国森林生态系统林冠层降雨截留特征. 生态学报, 2024, 44(7): 2981-2992.
- [9] 齐特,李玉婷,何会宾,张雪峰,赵廷宁. 冀北地区丰宁县水源林地水源涵养能力. 中国水土保持科学. 2016, 14(3): 60-67.
- [10] 曹恭祥. 六盘山香水河小流域植被结构水文影响及其坡面尺度效应[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2014.
- [11] 王艳兵,王彦辉,熊伟,姚依强,张桐,李振华. 六盘山半干旱区华北落叶松树干液流速率及主要影响因素的坡位差异. 林业科学. 2017, 53(6): 10-20.
- [12] Kumagai T, Tateishi M, Miyazawa Y, Kobayashi M, Yoshifuji N, Komatsu H, Shimizu T. Estimation of annual forest evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan (1): Water use components in Japanese cedar stands. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 66-76.
- [13] 刘军,陈文荣,徐金良,邹军,姜景民,李彦杰,刁松峰. 毛红椿人工林树干液流动态变化对坡位的响应. 应用生态学报. 2014, 25(8): 2209-2214.
- [14] 刘佩伶,陈乐,刘效东,戴雨航,冯英杰,张倩媚,褚国伟,孟泽. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤水分时空变异研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1798-1807.
- [15] Zhao Y L, Wang Y Q, Wang L, Fu Z H, Zhang X Y, Cui B L. Soil-water storage to a depth of 5m along a 500-km transect on the Chinese Loess Plateau. *CATENA*, 2017, 150: 71-78.
- [16] Ye L P, Fang L C, Shi Z H, Deng L, Tan W F. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by 'Grain for Green' program on the Loess Plateau, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 269: 204-214.
- [17] Zhao Y L, Wang Y Q, Wang L, Zhang X Y, Yu Y L, Jin Z, Lin H, Chen Y P, Zhou W J, An Z S. Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scales. *Catena*, 2019, 172: 387-396.
- [18] 张引,黄永梅,周光亮,梁文俊. 冀北山地5个海拔梯度油松林枯落物与土壤水源涵养功能研究. 水土保持研究, 2019, 26(2): 126-131.
- [19] 张鑫. 祁连山排露沟小流域典型植被土壤水文功能及增贮潜力研究[D]. 兰州:甘肃农业大学. 2018.
- [20] 和娴越,赵洋毅,王克勤,段旭,涂晓云. 中亚热带典型森林生态系统水源涵养功能. 东北林业大学学报, 2023, 51(8): 77-82.
- [21] 安金玲,牛赞,车宗玺,郝虎. 祁连山高寒山区典型植被类型水源涵养功能的灰色关联分析. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 93-101.
- [22] 刘宥延,刘兴元,张博,李妙莹. 基于InVEST模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [23] 程唱,贺康宁,俞国峰,柴世秀. 干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1979-1990.
- [24] Fu B, Wang Y K, Xu P, Yan K, Li M. Value of ecosystem hydropower service and its impact on the payment for ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 338-346.
- [25] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.

- [26] 范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 袁家根. 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局. 水土保持通报, 2017, 37(2): 50-56.
- [27] 刘效东, 张卫强, 冯英杰, 赵新宇, 甘先华, 周庆. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望. 生态学杂志, 2022, 41(4): 784-791.
- [28] 周国逸, 张德强, 李跃林, 张倩媚. 长期监测与创新研究阐明森林生态系统功能形成过程与机理. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 1036-1046.
- [29] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统的水源涵养功能. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [30] 李凯, 王根绪, 孙向阳, 张鑫玉, 李金龙. 西南地区森林生态系统水源涵养评价. 地理科学, 2023, 43(12): 2217-2227.
- [31] 黄兴成, 熊仕娟, 李渝, 张雅蓉, 刘彦伶, 阳路芳, 蒋太明. 贵州赤水河流域土壤水源涵养特征. 西南农业学报, 2022, 35(2): 412-417.
- [32] 张法伟, 李红琴, 罗方林, 王春雨, 王军邦, 马文婧, 杨永胜, 李英年. 基于增强回归树模型的三江源国家公园表层土壤储水及水源涵养功能的评估. 生态学杂志, 2022, 41(12): 2471-2478.
- [33] Zhao J X, Luo T X, Wei H X, Deng Z H, Li X, Li R C, Tang Y H. Increased precipitation offsets the negative effect of warming on plant biomass and ecosystem respiration in a Tibetan alpine steppe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 279: 107761.
- [34] Yuan X, Wang L Y, Wu P L, Ji P, Sheffield J, Zhang M. Anthropogenic shift towards higher risk of flash drought over China. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4661.
- [35] Evaristo J, McDonnell J J. Editorial Expression of Concern: Global analysis of streamflow response to forest management. *Nature*, 2019, 574(7777): E7.
- [36] Pinheiro E, Van Lier Q, Bezerra A. Hydrology of a water-limited forest under climate change scenarios: the case of the caatinga biome, Brazil. *Forests*, 2017, 8(3): 62.
- [37] Liu Z Q, Liu Q Q, Wei Z J, Yu X X, Jia G D, Jiang J. Partitioning tree water usage into storage and transpiration in a mixed forest. *Forest Ecosystems*, 2021, 8(1): 72.
- [38] Liu Z Q, Zhang H, Yu X X, Jia G D, Jiang J. Evidence of foliar water uptake in a conifer species. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 106993.
- [39] Deng Y, Kuo Y M, Jiang Z C, Qin X M, Jin Z J. Using stable isotopes to quantify water uptake by *Cyclobalanopsis glauca* in typical clusters of Karst peaks in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(2): 1039-1046.
- [40] Stahl C, Hérault B, Rossi V, Burbán B, Bréchet C, Bonal D. Depth of soil water uptake by tropical rainforest trees during dry periods: does tree dimension matter? *Oecologia*, 2013, 173(4): 1191-1201.
- [41] Cuthbert M O, Gleeson T, Moosdorf N, Befus K M, Schneider A, Hartmann J, Lehner B. Global patterns and dynamics of climate-groundwater interactions. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 137-141.
- [42] Scott R L, Huxman T E, Williams D G, Goodrich D C. Ecohydrological impacts of woody-plant encroachment: seasonal patterns of water and carbon dioxide exchange within a semiarid riparian environment. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 311-324.