

DOI: 10.20103/j.stxb.202212203625

刘春月, 信忠保, 李宗善, 买尔当·克依木. 基于刺槐年轮重建黄土丘陵区小流域年径流输沙研究. 生态学报, 2024, 44(1): 343-353.

Liu C Y, Xin Z B, Li Z S, Maierdang Keyimu. Reconstruction of annual runoff and sediment transport using tree-ring of black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.) in the Loess Hilly Region, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 343-353.

基于刺槐年轮重建黄土丘陵区小流域年径流输沙研究

刘春月^{1,2}, 信忠保^{1,2,*}, 李宗善³, 买尔当·克依木⁴

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

3 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

4 中国科学院新疆生态与地理研究所沙漠绿洲国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

摘要: 刺槐是广泛分布于黄土高原的典型水土保持植物。以黄土丘陵区甘肃天水吕二沟小流域为研究区, 分析了刺槐径向生长过程及其对气候因子的响应, 并开展了利用刺槐年轮估算小流域年径流量、年输沙量的适用性评估。研究表明: (1) 吕二沟刺槐人工林的径向生长随林龄呈明显的下降趋势, 在幼龄林阶段(1—10 a)刺槐处于快速径向生长期((4.17 ± 0.74) mm/a), 之后逐渐下降, 中龄林、成熟林、过熟林阶段(11—40 a)平均生长速率为(2.31 ± 0.41) mm/a, 较前期下降了 44.60%。刺槐胸高断面面积增量(BAI)在 1—10 a 平均以(5.46 ± 2.13) cm²/a 的速度生长, 在 11—40 a 仍保持上升趋势但年际间生长波动较大, 生长速率平均为(10.80 ± 1.95) cm²/a, 流域刺槐生长并未发生明显衰退。(2) 刺槐的径向生长与温度多呈负相关, 与降水、相对湿度及帕默尔干旱指数(PDSI)多呈正相关。其中刺槐径向生长与上年 8 月、9 月($P < 0.05$)及当年 7 月均温、最高温呈显著负相关($P < 0.01$), 与当年 5 月最低温呈显著正相关($P < 0.05$); 与当年 6 月、7 月降水量和上年 8 月、当年 7 月相对湿度呈显著正相关($P < 0.05$), 与当年 3 月相对湿度显著负相关($P < 0.05$); 与上年 6 月、上年 10 月—当年 1 月及当年 3 月—8 月 PDSI 显著正相关($P < 0.05$), 干旱胁迫明显抑制流域刺槐生长。(3) 1978—2017 年吕二沟流域年径流量、年输沙量呈减少趋势, 年际间波动较大, 存在明显丰枯阶段。流域径流输沙受降水量影响显著, 且径流输沙显著正相关($P < 0.001$)。(4) 利用刺槐年轮估算吕二沟流域年径流量、输沙量效果良好($P < 0.02$), 方法可行。比较而言, 相对自然条件下即人类干扰较少时径流输沙估算优于人类活动影响时期。利用树轮宽度反演水文过程可为缺乏水文观测资料区域提供参考。

关键词: 黄土高原; 刺槐; 树木年轮; 气候; 径流输沙

Reconstruction of annual runoff and sediment transport using tree-ring of black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.) in the Loess Hilly Region, China

LIU Chunyue^{1,2}, XIN Zhongbao^{1,2,*}, LI Zongshan³, MAIERDANG Keyimu⁴

1 College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County, Shanxi Province, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

Abstract: The black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.) is a typical soil and water conservation plant widely distributed in Lvergou watershed of loess hilly area on the Loess Plateau. In this study, the radial growth of black locust and its response to climatic factors were investigated, and the applicability of estimating annual runoff and sediment transport in the

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177319, 41877539); 中科院青促会项目(2022445)

收稿日期: 2022-12-20; **网络出版日期:** 2023-09-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinzhongbao@126.com

watershed by using the ring width of black locust was evaluated. The results indicated that: (1) the radial growth of black locust plantation in Lvergou watershed showed an obvious downward trend with forest age. Black locust was in a rapid radial growth period ((4.17 ± 0.74) mm/a) in the young forest stages (1—10a) and then the radial growth gradually decreased, and the average growth rate of middle, mature and over-mature forest stages (11—40 a) was (2.31 ± 0.41) mm/a, which decreased by 44.60% compared with the previous period. Basal area increment (BAI) of black locust increased at an average rate of (5.46 ± 2.13) cm²/a from 1—10 a, then kept an upward trend from 11—40 a, but its annual growth fluctuated greatly, with an average growth rate of (10.80 ± 1.95) cm²/a. (2) The radial growth of black locust was negatively correlated with temperature, and positively correlated with precipitation, relative humidity and Palmer Drought Index (PDSI). The radial growth of black locust was negatively correlated with the mean temperature and maximum temperature in August, September ($P < 0.05$) of previous year, July ($P < 0.01$) of current year, and positively correlated with the minimum temperature in May ($P < 0.05$) of current year. It was significantly positively correlated with the precipitation in June and July of current year and the relative humidity in August of previous year and July of current year ($P < 0.05$), and significantly negatively correlated with the relative humidity in March of current year ($P < 0.05$). The growth of black locust was positively correlated with PDSI in June of previous year, October of previous year to January of current year and March to August of current year ($P < 0.05$), which means that drought stress inhibited the growth of black locust significantly. (3) From 1978 to 2017, the annual runoff and sediment transport in the Lvergou watershed showed a decreasing trend, and the inter-annual fluctuation was large, with an obvious period of wet and dry. The runoff and sediment transport were significantly affected by precipitation, and the runoff and sediment transport were positively correlated ($P < 0.001$). (4) Our results indicated that using black locust tree rings to estimate the annual runoff and sediment transport in Lvergou watershed was effective ($P < 0.02$), and the method was feasible. In comparison, the estimation of runoff and sediment transport under natural conditions was better than that of under the influence of human activities. Our research findings demonstrate that tree ring analysis can be employed as a valuable tool for estimating hydrological data in regions where such observations are limited or unavailable.

Key Words: the Loess Plateau; *Robinia pseudoacacia*; tree-ring; climate; runoff and sediment transport

由于地形复杂、降雨集中、土质松散等原因,黄土高原是我国水土流失最严重的地区之一,为改善生态环境、防止水土流失,黄土高原进行了大规模植被恢复^[1-2]。刺槐是黄土高原重要的水土保持植物,具有耐旱、耐贫瘠、生长迅速、适应性强、根蘖性好、易繁殖等特点,在防风固沙、保持水土和水源涵养等方面发挥了重要作用^[3-4]。近年发现,黄土高原北部半干旱区刺槐林出现了不同程度的衰退,防护林功能明显下降^[5],因此有必要从更多区域开展黄土高原刺槐径向生长过程及其对气候因子响应研究,分析刺槐生长变化趋势,为黄土高原刺槐林经营与维护提供参考。

在人类活动和气候变化影响下,黄土高原水沙显著减少,研究水沙变化对黄土高原水土流失治理、生态建设具有重要意义^[6-8]。然而,部分地区水文站观测时间较短,难以从长时间序列角度揭示水沙变化过程。研究表明,树木生长受到诸多因素的综合影响,尤其与降水关系密切,而降水也是显著影响径流输沙的主导因素^[9-10]。因此,树木年轮成为估算径流输沙变化的重要代用指标^[11]。利用树木年轮重建水文变化已多有研究,如 Liu^[12]等利用黄河中、上游 31 个对水文变化敏感的树轮年表资料,重建了黄河中游 1492—2013 年间天然径流量变化;An^[13]等通过测量 3067 个样品,根据树轮氧同位素重建了长江上游过去 700 多年来的夏季(6—8 月)径流量;Chen^[14]等利用来自六个样地的树木年表数据,重建了 1500—2011 年间萨尔温江 9—6 月径流。这些研究多是在百年尺度上利用年轮重建水文过程,而从相对较短时间长度出发利用树木年轮开展重建水文过程的可行性评估尝试还较少。因此,研究在黄土丘陵区开展了利用刺槐年轮估算径流输沙研究工作。

本研究以黄土丘陵第三副区典型流域吕二沟刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)为研究对象,以流域气候和径流输沙数据为基础,采用树木年轮学方法研究流域刺槐径向生长过程及其对气候因子的响应,评估利用刺槐年轮宽度估算流域内年径流量、输沙量的精度,分析利用刺槐年轮宽度预测流域径流输沙的可行性,以期缺乏水文观测小流域的径流输沙估算提供方法。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

吕二沟位于甘肃省天水市南郊,属于黄土丘陵区第三副区,是渭河支流藉河右岸的一级支沟,呈南北流向(图1)。流域降水集中在夏秋季,春冬干旱少雨,流域内年均降水量(501.90 ± 118.10) mm (1978—2017年),汛期(6—9月)降水量占年降水量的63.10%,年平均气温(11.5 ± 0.68) °C (1978—2017年),属于典型的暖温带大陆性季风气候(图2)。流域土壤以黄土质灰褐土为主^[15],植被类型为温带落叶林,主要乔木树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,其中,刺槐是主要水土保持树种,在保持水土、改善区域小气候等方面发挥重要作用^[16]。流域内主要灌木树种有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、酸枣(*Ziziphus acidojuba*)等,草本植物有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)等^[17]。

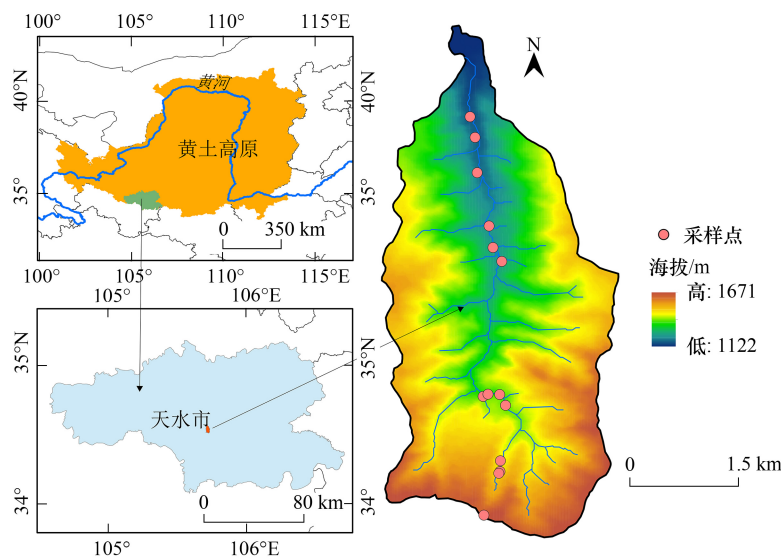


图1 黄土高原吕二沟流域刺槐采样点分布图

Fig.1 Location map of tree-ring sample site of *Robinia pseudoacacia* in Lvergou watershed, Loess Plateau

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集

根据吕二沟的地形及刺槐的分布区域,在吕二沟流域沿沟道选取长势较好、胸径较大的刺槐进行采样,用瑞典 Haglof 500 mm 生长锥(5.15 mm)在胸径(约 1.3 m)处沿东西、南北方向采集 2 个树芯,取好后将样芯放到塑料管内封存,同时记录刺槐的树号、胸径、树高、冠幅等基本信息(表1)。共采集 27 棵刺槐,获取了 54 根树芯,去除 9 根未采集到树芯的不合格样品,剩余 45 根树芯。

1.2.2 样品的处理及年表建立

野外采集的样芯按照国际树木年轮数据库中描述的方法进行预处理。样芯风干后用乳白胶固定在特制的木槽内,并用细线将二者捆绑固定^[18]。乳胶干后取下细线并切割成单个样芯,分别用 400 目、800 目和 1200 目的干砂纸逐步打磨样芯以获取清晰的年轮界限。利用精度为 0.001 mm 的树木年轮测量分析仪 Win

DENDRO 获取年轮宽度参数^[19]。使用 COFECHA 程序^[20]对交叉定年和测量结果进行检验和校准以确保准确性,为了分析较长时间序列刺槐径向生长过程及其与气候因素的相关性,最终选取 20 根 1980s 的刺槐树芯建立年表。

研究利用 ARSTAN 程序建立年表,对年轮序列进行去趋势和标准化的过程。在去趋势过程中,去趋势方法选择方法“2”,即建立指数年表,对每个年轮宽度序列进行负指数曲线拟合,剔除与树木年龄等非气候因素有关的趋势,最终建立三种去趋势年轮年表,标准化年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)^[21]。综合各年表的统计参数特征,本研究选用标准年表进行树木生长与气候因素间的相关分析。

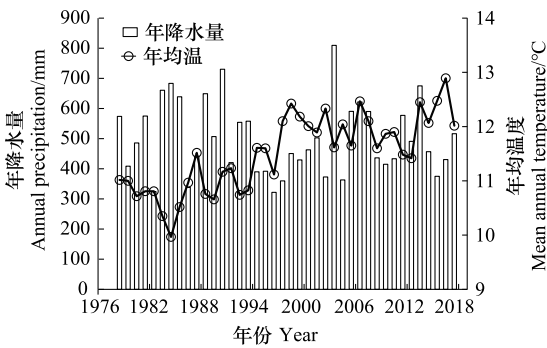


图2 1978—2017 年吕二沟流域天水气象站温度和降水的变化趋势

Fig.2 Temperature and precipitation changing trend of Tianshui Meteorological Station from 1978 to 2017

表1 采样点概况

Table 1 Description of sampling sites

树种 Tree species	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔范围 Altitude/m	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Mean tree height/m	东西平均冠幅 East-West average crown width/m	南北平均冠幅 North-South average crown width/m
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> Linn.	105.43° E	34.30° N—34.33° N	1228—1518	26.02±6.02	11.68±2.37	6.16±1.63	6.15±1.51

1.2.3 胸高断面积增量

胸高断面积增量(Basal area increment, BAI)是用当年树木胸高处断面积减去上一年树木断面积,在年轮宽度减小时,树木材积量依旧可能增加,胸高断面积增量相比于年轮宽度能够更好地反映树木生长趋势^[22]。树木胸高断面积增量计算公式为:

$$BAI = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2)$$

式中, R_n 是 n 年的树轮半径; R_{n-1} 是 $n-1$ 年的树轮半径。

1.2.4 气象、径流泥沙数据来源

气象资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),获取 1978—2017 年天水气象站月平均气温、月平均最低气温、月平均最高气温、月降水量和月平均相对湿度数据。研究选用帕默尔干旱指数(Palmer drought index, PDSI)作为反映土壤水分的指标,从全球气候数据库(CRU TS 3.22 Global Climate Database, <http://www.cru.uea.ac.uk/>)中选取了距采样点最近的 CRU 网格点(105.00°—105.50° E, 34.00°—34.50° N) PDSI 数据,时间区间为 1978—2017 年。径流泥沙数据(1978—2017 年)从天水水土保持试验站获取。流域气候环境表现为雨热同期(图 3),自 1978 年以来,年降水量呈不显著下降趋势,月平均气温、月平均最低温和月平均最高温均呈上升趋势(图 4)。

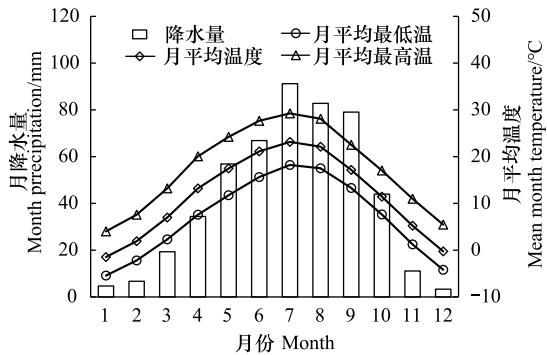


图3 1978—2017 年吕二沟流域温度降水季节分布

Fig.3 Seasonal distribution of temperature and precipitation in Lvgou watershed from 1978 to 2017

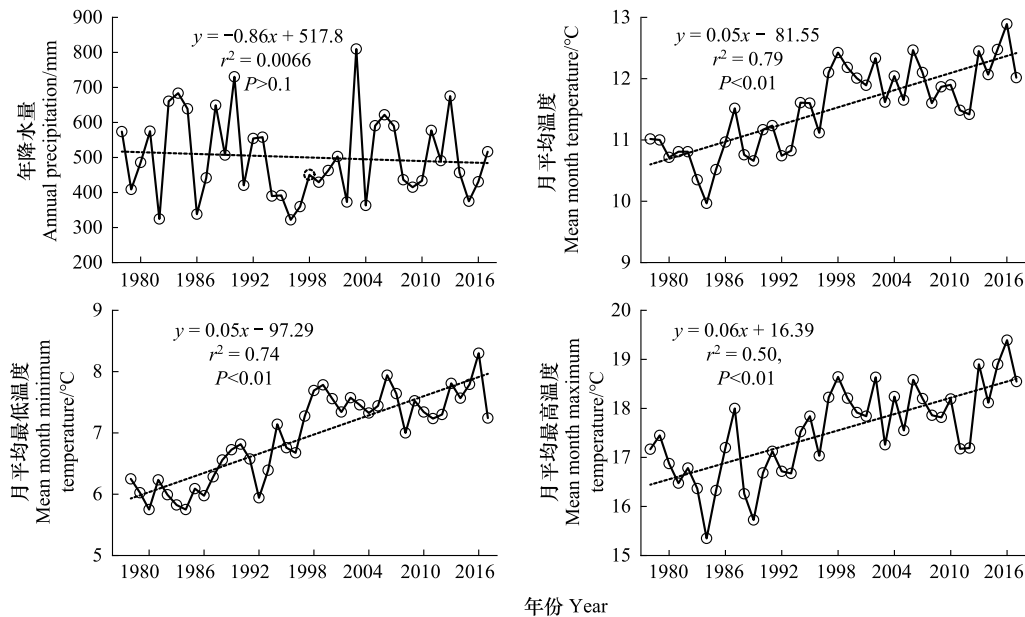


图4 1978—2017年吕二沟流域温度降水变化趋势

Fig.4 Variation trend of temperature and precipitation in Lvergou watershed from 1978 to 2017

1.2.5 数据处理及图表制作

利用 DENDROCLIM 2002 分析年表与各个气候要素间的相关性。考虑到气候对刺槐生长影响具有滞后效应,即当年的刺槐生长可能会受前一年的气候影响^[23],因此,选用上一年6月到当年10月(共17个月)的气候数据进行相关性分析。使用 Origin Pro 2022 与 Excel 2021 软件进行图表绘制。

2 结果分析

2.1 刺槐径向生长变化趋势

吕二沟刺槐的径向生长随林龄呈下降趋势(图5),根据林龄将吕二沟流域的刺槐生长划分为2个阶段,在1—10 a 刺槐处于幼龄林阶段,处于快速生长期,生长速率为 (4.17 ± 0.74) mm/a,在11—40 a 刺槐处于中龄林、近熟林、成熟林、过熟林阶段,生长速率逐渐下降为 (2.31 ± 0.41) mm/a,相比前期下降44.60%。刺槐胸高断面面积增量BAI在1—10 a 平均以 (5.46 ± 2.13) cm²/a的速度快速增长,在11—40 a 刺槐BAI仍保持上升趋势但其年际间生长波动较大,生长速率平均为 (10.80 ± 1.95) cm²/a。

2.2 树轮年表统计特征

基于20根刺槐样芯建立了树轮宽度标准年表(图6),由刺槐标准年表的统计特征分析可知(表2),刺槐的主序列长度为40年(1978—2017年),平均敏感度大于0.2,表明吕二沟流域刺槐生长对外界环境变化比较敏感^[24],标准差为0.24,信噪比为3.92,说明年表包含较多的气候信息,一阶自相关系数为0.62,说明刺槐径向生长受上一年气候因素影响较大^[25],样本总体代表性较高,可用来分析其与气候因素的相关性。

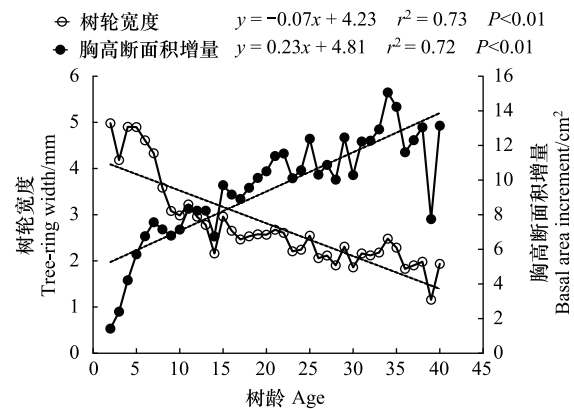


图5 吕二沟流域刺槐树轮宽度和胸高断面面积增量(BAI)变化

Fig.5 Variation of *Robinia pseudoacacia* tree-ring width and BAI of Lvergou watershed

2.3 刺槐径向生长与气候因子的相关性

刺槐标准年表与气候因子相关分析表明,刺槐的径向生长与温度相关性表现为负相关,与降水、相对湿度及 PDSI 多呈正相关(图 7)。其中刺槐径向生长与上年 8 月、9 月及当年 7 月($P<0.01$)均温、最高温呈显著负相关,与当年 5 月最低温呈显著正相关($P<0.05$)(图 7)。与当年 6 月、7 月($P<0.01$)降水量和上年 8 月、当年 7 月($P<0.01$)相对湿度呈显著正相关,与当年 3 月相对湿度显著负相关($P<0.05$)(图 7)。PDSI 和刺槐径向生长均呈正相关,其中刺槐生长和上年 6 月、上年 10 月—当年 1 月、当年 3 月—8 月 PDSI 呈显著正相关。整体而言,降水和相对湿度对刺槐生长呈促进作用,刺槐受水分限制作用较强,温度上升多抑制刺槐生长。

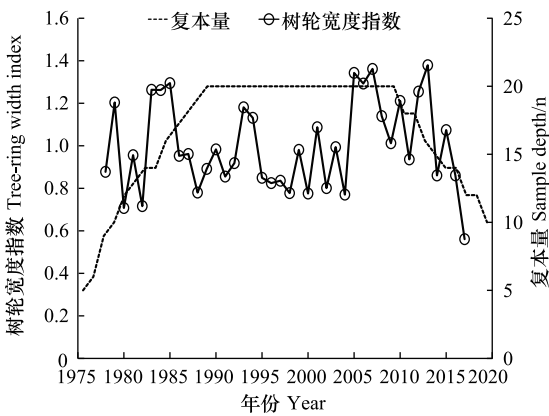


图 6 吕二沟流域刺槐标准年表
Fig.6 Standard chronology of *Robinia pseudoacacia* in Lvergou watershed

表 2 刺槐标准年表

Table 2 Statistical characteristics of the standard chronology of <i>Robinia pseudoacacia</i> in Lvergou watershed			
统计特征 Statistical characteristic	标准年表 Standard chronology	统计特征 Statistical characteristic	标准年表 Standard chronology
序列长度 Time span(A.D)	40.00	样本总体代表性 Express population signal	0.80
平均敏感度 Mean sensitivity	0.28	树间相关系数 Correlation between trees	0.48
标准差 Standard deviation	0.24	一阶自相关系数 First-order autocorrelation	0.62
信噪比 Signal-to-noise ratio	3.92		

2.4 径流输沙与树轮年表的相关分析

2.4.1 降水径流输沙关系

1978—2017 年间吕二沟流域径流输沙和降水呈显著正相关($P<0.001$)(图 8)。流域径流输沙整体呈下降趋势,径流输沙呈显著正相关($P<0.001$),年际间波动较大,存在明显丰枯水年(图 9)。根据降雨径流输沙双累积曲线可知 1992 年流域径流输沙发生变化,以 1992 年为界可分为前期后期(图 10)。

2.4.2 径流输沙与刺槐树轮年表相关性

刺槐树轮宽度指数与流域 1978—2017 年径流输沙量相关性显著($P<0.02$),说明其适用于估算吕二沟流域年径流输沙(图 11)。由于流域水沙在 1992 年发生变化,因此据其将 1978—2017 年分为前期后期两个时期进一步分析。相比较而言,1978—1992 年径流输沙估算效率优于 1993—2017 年,前期 r^2 高于后期。具体来看,刺槐轮宽指数与 1978—1992 年的年径流量、输沙量复相关系数(r^2)分别为 0.38($P<0.01$)和 0.29($P<0.05$),刺槐轮宽指数与 1993—2017 年年径流量、输沙量复相关系数(r^2)分别为 0.16($P<0.05$)和 0.22($P<0.02$)(图 12)。总体而言,在前期受人类活动干扰较少时利用树木年轮反演流域径流输沙效果更好。

3 讨论

3.1 刺槐径向生长特征

吕二沟流域刺槐径向生长可依据树龄划分为两个阶段:幼龄林(1—10 a)与中龄林至过熟林阶段(11—40 a),1—10a 处于快速增长期,11—40a 为生长下降期,生长速率较前一阶段降低 44.60%。随着树龄的增大,刺槐生长进入成熟期,刺槐树轮宽度逐渐下降,生长速率减慢。相关研究表明,刺槐径向生长在前 15 a 左右增长速率较快,随后增长速率下降并进入稳定生长期^[26—27],与本文研究结果相似。BAI 总体仍保持增长趋势,在 22a 树龄后出现上下波动情况,趋于平缓,但未出现明显下降趋势,说明流域刺槐生产力处于稳定期。

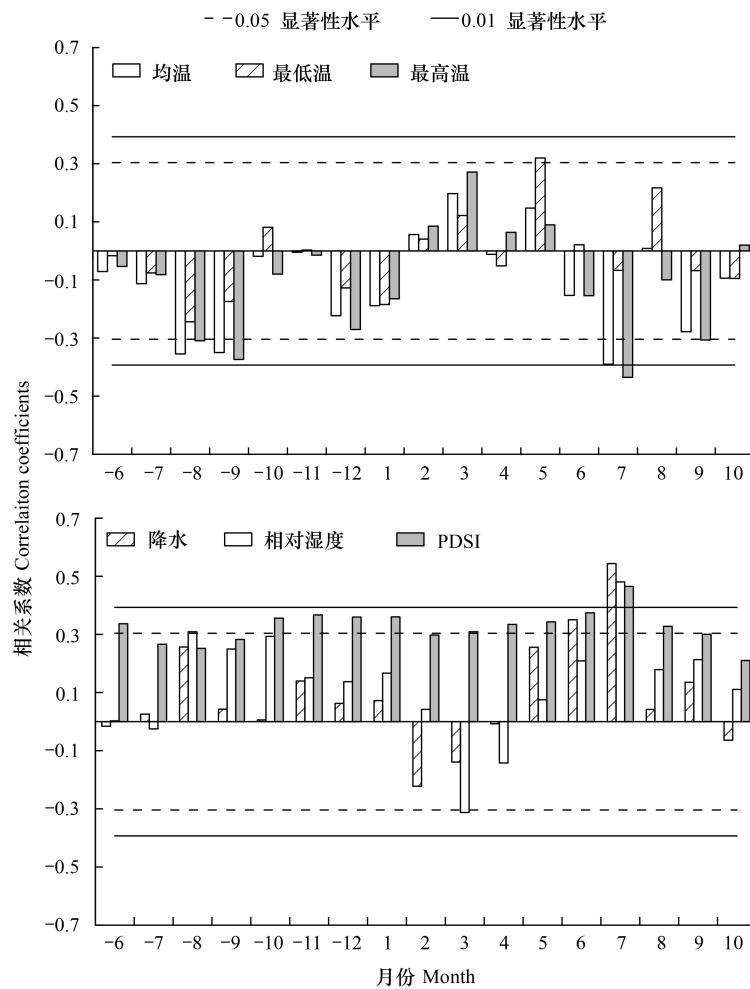


图7 吕二沟流域刺槐标准年表与气候因子相关性

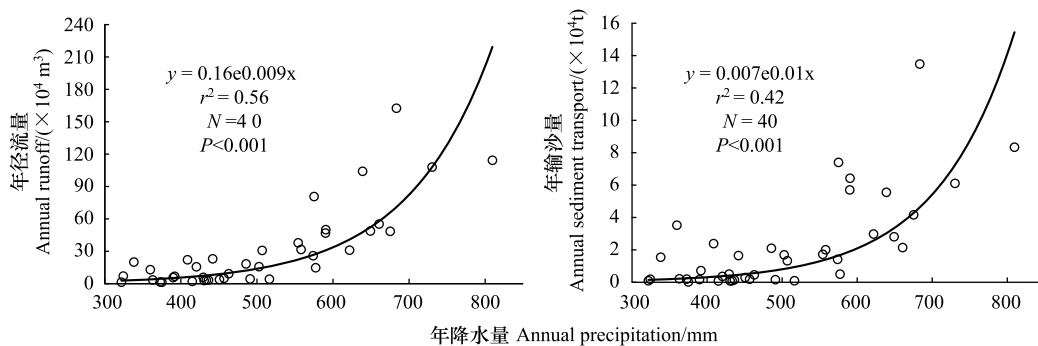
Fig.7 Correlation of *Robinia pseudoacacia* standard chronologies with climate factors in Lvergou watershed

图8 1978—2017年吕二沟流域降水与径流输沙关系

Fig.8 Relationship of precipitation with runoff and sediment transport in Lvergou Watershed from 1978 to 2017

此外,刺槐生长受气候变化影响显著,吕二沟流域属于半干旱地区,流域树木生长受水分限制作用较强。近年来,流域降水波动减少,温度逐年上升,随着林龄增大,刺槐生长速率开始减缓,但BAI仍保持上涨趋势,表明流域刺槐长势良好,并未发生衰退。在未来,若气候暖干化加剧,随着刺槐树龄增长及干旱胁迫加重,流域刺槐生长限制作用加强,树木抵抗病虫害能力下降,林木个体生长速率降低,刺槐健康生长将面临较大风险。

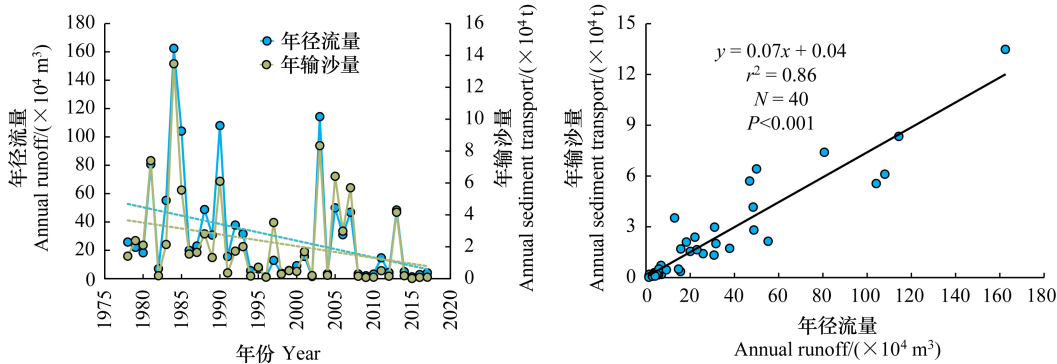


图9 1978—2017年吕二沟流域径流输沙关系

Fig.9 Relationship between runoff and sediment transport in Lvergou watershed from 1978 to 2017

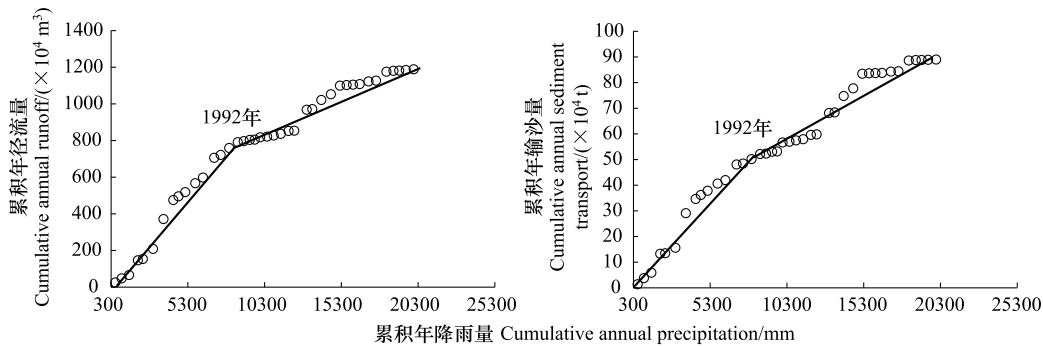


图10 1978—2017年吕二沟流域水沙双累积曲线

Fig.10 Double cumulative curve of water and sediment in Lvergou watershed from 1978 to 2017

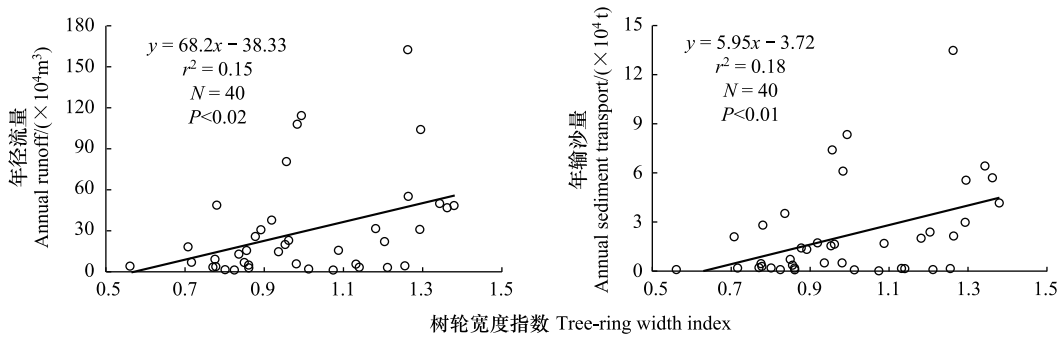


图11 1978—2017年刺槐树轮宽度指数与径流输沙关系

Fig.11 Relationship of *Robinia pseudoacacia* ring width index with runoff and sediment transport between 1978 and 2017

3.2 刺槐径向生长对气候因子的响应

标准年表与月气象因子的相关性分析表明:降水和相对湿度增加促进吕二沟流域刺槐径向生长,而刺槐径向生长与温度多呈负相关,刺槐生长受水分胁迫影响深刻,这与韦景树等^[28]、管崇帆等^[29]研究结果相似。降水可以促进刺槐的生长,刺槐径向生长与降水多呈正相关关系。这是由于树木进入生长季以后,生长期充足的降水加快了光合产物生成,有利于树木后期的生长^[4,30-31]。吕二沟流域雨热同期,在夏季树木各项生理活动进入旺盛时期,温度过高会使树木蒸腾作用加强,合成有机物质减少,从而抑制植物生长,此时降水对

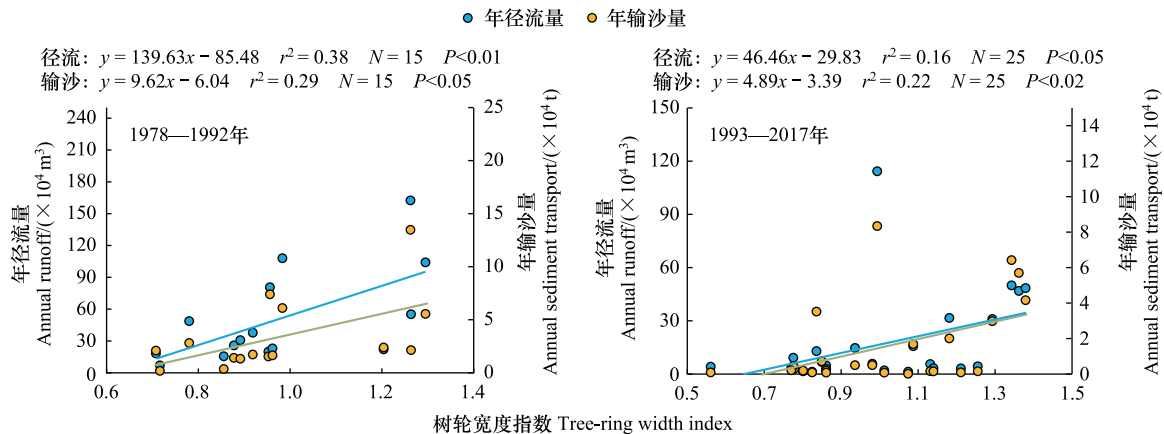


图 12 不同时期刺槐树轮宽度指数与径流输沙关系

Fig.12 Relationship of *Robinia pseudoacacia* ring width index with runoff and sediment transport in different periods

刺槐生长起到重要促进作用,降水成为刺槐快速生长的有利因素,因此刺槐径向生长与7月降水量正相关关系最显著^[28,32]。

温度对刺槐径向生长的影响主要反映在月平均最高温度和月平均温度对树木生长产生的限制作用上。刺槐与上年8、9月及当年7月月平均温度和月平均最高温度呈显著负相关,高温加剧了刺槐的蒸腾作用,土壤水分减少,干旱胁迫效应增强,使得树木生理代谢活动受限,光合作用有机物积累减少,限制刺槐径向生长^[33-34]。

帕默尔干旱指数是一个综合考虑了降水、温度和土壤水分状况的指标,常用于干旱区的研究。它能够反映土壤水分的有效性,并提供区域干湿变化的信息^[35]。流域刺槐树轮宽度指数与各月份PDSI均呈正相关,其中与上一年生长季末期及当年生长季PDSI呈显著正相关,说明刺槐生长受水分条件制约显著。此外,流域刺槐树轮宽度指数总体变化趋势与气候因子变化紧密相关,进一步说明干旱是流域刺槐径向生长的主要影响因素。1978—1985年树轮宽度指数总体呈上升趋势(1.04 ± 0.23),流域多年平均降雨量为(536.24 ± 114.51) mm,干旱指数为 0.13 ± 0.99 ;1986—2004年树轮宽度指数下降为 0.91 ± 0.12 ,此时流域降水减少为(476.49 ± 130.16) mm,干旱程度加重(-1.18 ± 1.34);而2005—2017年树轮宽度指数发生增长(1.10 ± 0.23),流域降水量亦增至(507.87 ± 90.46) mm,干旱指数降至 -0.16 ± 1.08 。在流域气温逐渐上升的背景下,表明水分是区域刺槐生长的限制性因素,刺槐生长受干旱胁迫严重。

3.3 利用刺槐估算流域年径流输沙可行性

气候-树轮-径流输沙的相互关系分析表明,吕二沟流域径流输沙受降水影响显著,同时降水也是刺槐生长的重要影响因子。因此,在缺乏降水、径流输沙等水文数据观测时,利用树轮与降水关系可以推测缺乏水文观测流域的径流输沙年际变化特征,但受人类活动影响,估算精度随之下降。吕二沟流域从1953年开始进行选点调查,确定为水土流失重点治理流域。在20世纪80年代,黄河水利委员会天水水土保持试验站进行了修建梯田、造林等水土保持建设,流域在1982年林地面积仍然较少,而到1993年林地面积比例显著增长达到31.45%,2004年增长至42.29%^[15,36-37]。随着流域水土保持措施的不断加强,径流输沙显著减少,相比于1978—1992年,1993—2017年降雨—径流输沙双累积曲线斜率下降,即径流输沙对降雨的敏感性减弱,受降雨影响减小,致使利用刺槐年轮估算径流输沙精度降低。而在相对自然条件下,流域地表径流输沙受人类活动干扰较少,降雨径流输沙关系较为良好,树木年轮包含较多水文信息,因此利用树木年轮进行水文反演效果较好,而随着人类活动加剧,水文过程受人类活动影响加深,导致利用树木年轮估算径流输沙精度下降。

此外,与以往多数研究在百年尺度进行径流输沙反演不同,本研究依据40年时间序列刺槐年轮进行了树轮宽度指数与径流输沙反演可行性分析。结果显示,树轮宽度指数与年径流输沙相关性均超过 $P < 0.02$ 显著

性水平,可进行径流输沙估算。然而与其他较长尺度研究相比, r^2 相对较低,估算精度不高。如 Akkemik^[38]等在土耳其利用树轮进行了 350 年春夏(5—8 月)径流重建,其 r^2 达到 0.5; Ravindranath 等^[39]基于贝叶斯模型在密苏里河区域进行了 60 年左右径流重建,调整后 r^2 达到 0.5; Hutton 等^[40]在旧金山河口进行了公元 903—2008 年的径流反演工作, r^2 为 0.66; Yang 等^[41]在中国澜沧江—湄公河通过树木年轮进行了 450 年尺度的径流重建研究,其 8 个年表与径流平均 r^2 为 0.48。20 世纪 60 年代,刺槐才逐渐成为黄土高原上的主要造林物种,因此,研究分析刺槐树轮时间序列多为 30—40 年^[42—45]。为了拓展树轮估算径流输沙时间尺度,提高估算精度,未来可以对更多树种的年轮进行方法上的探索。

4 结论

为了分析黄土丘陵区刺槐林生长的趋势性,论证利用刺槐年轮宽度估算径流输沙的可行性,研究在黄土丘陵区第三副区典型小流域吕二沟采集了刺槐树轮样本,建立树轮宽度标准年表,开展了气候—树轮—径流输沙的相互关系分析。结果表明:吕二沟流域刺槐生长具有明显的阶段性,相比于幼龄林阶段(1—10 a),中龄林、近熟林、成熟林、过熟林阶段(11—40 a)生长速率下降,但 BAI 仍保持增长趋势,表明流域刺槐生长良好并未发生衰退。吕二沟流域刺槐径向生长与温度呈负相关,而与降水、相对湿度和 PDSI 正相关,流域刺槐生长受干旱胁迫严重。吕二沟流域径流输沙量与刺槐年轮宽度呈显著正相关($P<0.001$),利用刺槐估算流域径流输沙总体可行($P<0.02$),后期因受人类活动影响,致使利用年轮估算径流输沙效果随之下降。研究表明:在 40 年时间序列长度上,利用刺槐年轮宽度估算黄土丘陵区小流域年径流输沙量方法可行,但随着人类活动加剧估算精度随之下降,该方法可为缺乏水文观测流域水文分析提供参考。

参考文献(References):

- [1] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [2] 穆兴民, 李朋飞, 刘斌涛, 赵广举, 高鹏, 孙文义. 1901—2016 年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制. 人民黄河, 2022, 44(9): 36-45.
- [3] 邓强, 刘迪, 时新荣, 袁志友. 黄土高原刺槐人工林下植物多样性对模拟降水变化的响应. 水土保持研究, 2021, 28(1): 1-10.
- [4] Keyimu M, Li Z S, Fu B J, Chen W L, Wei J S, Jiao L, Gao G Y, Lü Y H. Spatial differences in the radial growth responses of black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.) to climate on the Loess Plateau, China. Dendrochronologia, 2021, 67: 125832.
- [5] 韦景树, 李宗善, 冯晓娟, 张园, 陈维梁, 伍星, 焦磊, 王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [6] 彭杨, 陈仕豪, 时玉龙. 黄河下游水沙变化多时间尺度集对分析. 泥沙研究, 2021, 46(2): 35-41.
- [7] 宁怡楠, 杨晓楠, 孙文义, 穆兴民, 高鹏, 赵广举, 宋小燕. 黄河中游河龙区间径流量变化趋势及其归因. 自然资源学报, 2021, 36(1): 256-269.
- [8] 范俊健, 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 王瑞东. 1956—2017 年黄河上游水沙变化及其驱动因素. 中国水土保持科学: 中英文, 2022, 20(3): 1-9.
- [9] 李宗善, 陈维梁, 韦景树, 买尔当·克依木, 张育新, 张霜, 王晓春. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征. 生态学报, 2021, 41(1): 27-37.
- [10] 张凯, 鲁克新, 李鹏, 李占斌, 时鹏, 杨殊桐. 近 60 年汾河中上游水沙变化趋势及其驱动因素. 水土保持研究, 2020, 27(4): 54-59.
- [11] Stockton C W, Fritts H C. Long-term reconstruction of water level changes for lake athabasca by analysis of tree rings. Journal of the American Water Resources Association, 1973, 9(5): 1006-1027.
- [12] Liu Y, Song H M, An Z S, Sun C F, Trouet V, Cai Q F, Liu R S, Leavitt S W, Song Y, Li Q, Fang C X, Zhou W J, Yang Y K, Jin Z, Wang Y Q, Sun J Y, Mu X M, Lei Y, Wang L, Li X X, Ren M, Cui L L, Zeng X L. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 Y. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(31): 18251-18257.
- [13] An W L, Li J J, Wang S, Xu C X, Shao X M, Qin N S, Guo Z T. Hydrological extremes in the Upper Yangtze River over the past 700yr inferred from a tree ring $\delta^{18}\text{O}$ record. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2022, 127(10): e2021JD036109.
- [14] Chen F, Shang H M, Panyushkina I, Meko D, Li J B, Yuan Y J, Yu S L, Chen F H, He D M, Luo X. 500-year tree-ring reconstruction of Salween River streamflow related to the history of water supply in Southeast Asia. Climate Dynamics, 2019, 53(11): 6595-6607.
- [15] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 雷启祥, 张满良, 苏广旭. 黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析. 中国水土保持科学, 2013, 11(5):

1-8.

- [16] 秦瑞杰, 陆广勇, 安乐平, 李雷, 蔡玖镠. 水土保持措施对罗玉沟流域水沙变化的影响. 中国水土保持, 2019(1): 19-22, 69.
- [17] 吕锡芝, 康玲玲, 左仲国, 孙娟, 倪用鑫. 黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1113-1117.
- [18] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree ring dating[D]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [19] Keyimu M, Li Z S, Jiao L, Chen W L, Wu X C, Fan Z X, Zeng F J, Fu B J. Radial growth response of *Quercus liaotungensis* to climate change: a case study on the central Loess Plateau, China. Trees, 2022, 36(6): 1811-1822.
- [20] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43:51-67.
- [21] Evin J. Tree ring and climate. Geobios, 1977, 10(2):315-318.
- [22] 谢立红, 黄庆阳, 曹宏杰, 杨帆, 王继丰, 倪红伟. 气候变暖对黑龙江省五大连池兴安落叶松径向生长的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2022, 46(2): 150-158.
- [23] Yu D P, Liu J Q. Spatial variation and temporal instability in the climate - growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 96-105.
- [24] 崔佳月, 彭剑峰, 李静茹, 李轩, 彭猛, 杨柳. 高山地区油松人工林树轮宽度对气候因子的响应. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3497-3504.
- [25] 苑丹阳, 赵慧颖, 李宗善, 朱良军, 国森, 张远东, 王晓春. 伊春地区红松和红皮云杉径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40(4): 1150-1160.
- [26] 刘江华. 黄土高原刺槐人工林生长特征及其天然化程度评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2008.
- [27] 焦醒, 刘广全. 黄土高原刺槐生长状况及其影响因子. 国际沙棘研究与开发, 2009, 7(2): 42-48.
- [28] 韦景树, 李宗善, 焦磊, 陈维梁, 伍星, 王晓春, 王帅. 黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异. 生态学报, 2018, 38(22): 8040-8050.
- [29] 管崇帆, 郑京生, 李雅婧, 张蓝霄, 胡美均, 张劲松, 孟平, 孙守家. 气候和密度对刺槐径向生长和干旱脆弱性的影响. 生态学报, 2023(8): 1-12.
- [30] 王婷, 于丹, 李江风, 马克平. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展. 植物生态学报, 2003, 27(1): 23-33.
- [31] 范玮熠, 王孝安. 树木年轮宽度与气候因子的关系研究进展. 西北植物学报, 2004, 24(2): 345-351.
- [32] 王童, 孙玉军, 乔晶晶. 将乐林场马尾松树轮宽度对气候变化的响应. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 30-39.
- [33] 姜盛夏, 袁玉江, 喻树龙, 尚华明, 张瑞波, 秦莉, 张合理, 张同文. 阿尔泰山西伯利亚云杉多种树轮宽度年表研制及其气候响应研究. 地球环境学报, 2020, 11(6): 616-628.
- [34] 岳伟鹏, 陈峰, 袁玉江, 喻树龙, 高志鸿, 赵晓恩. 气候变暖背景下云南西北部大果红杉径向生长衰退及其气候驱动因子分析. 生态学报, 2022, 42(6): 2331-2341.
- [35] 尚建勋, 时忠杰, 高吉喜, 徐丽宏, 吕世海, 冯朝阳, 王鲁秀. 呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应. 生态学报, 2012, 32(4): 73-80.
- [36] 陈月红, 余新晓, 秦富仓, 干平, 刘广全. 吕二沟小流域水土保持措施对径流和侵蚀产沙的影响. 水利水电技术, 2007, 38(8): 30-33, 37.
- [37] 伍飞舟, 杨卓, 牛健植, 张大伟, 张晓明, 陈月红. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用与水土保持措施的变化特征. 水土保持研究, 2010, 17(2): 10-14, 19.
- [38] Akkemik Ü, D'Arrigo R, Cherubini P, Kose N, Jacoby G. Tree - ring reconstructions of precipitation and streamflow for north - western Turkey [J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 28(2):173-183.
- [39] Ravindranath A, Devineni N, Lall U, Cook E R, Pederson G, Martin J, Woodhouse C. Streamflow reconstruction in the upper Missouri River Basin using a novel Bayesian network model. Water Resources Research, 2019, 55(9): 7694-7716.
- [40] Hutton P H, Meko D M, Roy S B. Supporting restoration decisions through integration of tree-ring and modeling data: reconstructing flow and salinity in the San Francisco estuary over the past millennium. Water, 2021, 13(15): 2139.
- [41] Yang B, Chen X H, He Y H, Wang J W, Lai C G. Reconstruction of annual runoff since CE 1557 using tree-ring chronologies in the upper Lancang-Mekong River Basin. Journal of Hydrology, 2019, 569: 771-781.
- [42] 赵娜, 孟平, 张劲松, 陆森, 程志庆. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价. 应用生态学报, 2014, 25(2): 351-358.
- [43] 段媛媛, 宋丽娟, 牛素旗, 黄婷, 杨改河, 郝文芳. 不同林龄刺槐叶功能性状差异及其与土壤养分的关系. 应用生态学报, 2017, 28(1): 28-36.
- [44] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 孙文义, 赵广举, 顾朝军. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响. 中国环境科学, 2019, 39(2): 713-722.
- [45] 雷磊, 万昊, 江涛, 师一卿, 吕平海, 田堪良, 王晓东, 杨傲秋. 不同生长年限的刺槐根系对黄土边坡加固作用的研究. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 183-188, 199.