

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.007

北洛河上游植被恢复对河川径流组分影响的定量区分

潘成忠¹, 陈恬玥¹, 晁智龙², 李 萍³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 陕西省水文水资源勘测局, 陕西 西安 710086;

3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 植被恢复和气候变化对半干旱黄土区径流及其组分的定量贡献仍不明确。采用弹性系数法定量探讨了植被恢复和气候变化对北洛河上游吴旗、志丹、刘家河水文站径流深及其组分变化的贡献。结果表明: 1971—2010年, 3站径流深、地表径流深均呈显著减少趋势, 地表径流占总径流的45%~56%, 各站基流深变化趋势不一致, 突变点均在2002—2003年; 1999年以来北洛河上游林草占地面积占比增加15.1%, 且以林地为主; 植被恢复、降水和潜在蒸散发对3站径流深减少的平均贡献率分别为73%、19%和8%, 对地表径流深变化的平均贡献率分别为67%、19%和14%, 且植被恢复程度越好其贡献率越大。良好的植被恢复显著减少河川径流和地表径流, 但可能增加基流, 研究结果可为该区水资源开发利用提供依据。

关键词: 径流变化; 植被恢复; 驱动因素; 基流; 北洛河上游

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2025)01-0076-09

植被与水的关系一直是生态水文学的研究热点, 森林砍伐、植被恢复对河川径流的影响认识在全球范围内仍不一致^[1]。自1999年退耕还林(草)工程在黄土区大规模实施以来, 该区植被覆盖度由1999年的32%增至2018年的63%, 水土流失问题得到了有效遏制^[2]。植被恢复也带来了一些负面问题, 如河川径流减少等。大量研究表明, 黄土区河川径流受到气候变化和人类活动的综合影响, 植被变化深刻影响该区径流及其组分, 使得原本干旱缺水的黄土区水资源供需矛盾的形势愈发严峻^[3]。因此, 急需开展植被恢复和气候变化对径流及其组分变化影响的贡献识别, 为该区植被建设和水资源开发利用提供科学指导。

目前, 径流变化归因分析的方法主要有双累积曲线法、弹性系数法、水文模型法等^[4]。Budyko理论^[5]反映了流域降水和潜在蒸散发之间存在耦合平衡关系。基于此理论, Choudhury^[6]、Yang等^[7]、Zhang等^[8]分别从流域面积、下垫面特征、植被变化等方面对Budyko框架进行了改进, 并在此基础上结合弹性系数法识别径流变化的主要驱动因素。基于Budyko理论的弹性系数法具有物理意义明确、参数易获取等优点, 被广泛应用于气候及人类活动对径流变化贡献的定量评估^[9]。例如, Berghuijs等^[10]、Liang等^[11]采用该方法分别对全球范围内典型河流、黄土高原14个典型流域总径流变化的驱动因素进行识别, 定量区分了降水、潜在蒸散发及典型人类活动对径流变化的贡献; 夏露等^[12]探讨了汾河源区北石河流域基流、地表径流变化的驱动因素, 认为降水对于基流增加、地表径流减少的影响更为显著。黄土区作为重点实施退耕还林(草)工程的地区受到广泛关注。薛帆等^[13]、刘二佳等^[14]识别了北洛河上游河川总径流变化的驱动因素, 均认为植被恢复对径流变化的贡献超过50%, 但针对径流各组分(基流、地表径流)的研究尚少, 难以全面揭示植被对河川径流的作用机制。此外, 先前的研究鲜见对不同植被恢复状况流域的径流变化及其归因分析的对比研究。

本研究以北洛河上游不同植被恢复程度的3个水文站以上集水区(吴旗、志丹、刘家河)为研究对象, 基

收稿日期: 2024-09-12; 网络出版日期: 2024-12-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/32.1309.P.20241220.1654.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077059)

作者简介: 潘成忠(1980—), 男, 江苏灌云人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水土保持与生态水文研究。

E-mail: pancz@bnu.edu.cn

于1971—2010年水文气象资料和4期土地利用数据,分析总径流及其组分(基流、地表径流)的变化趋势,采用弹性系数法开展气候因素、植被恢复对径流及其组分变化的定量归因分析,以期对北洛河上游退耕还林(草)工程的实施和水资源高效利用提供科学支持。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

北洛河为渭河的一级支流、黄河的二级支流,发源于白于山南麓的草梁山,流经甘肃省庆阳和陕西省延安、榆林、渭南、铜川等5个地级市以及志丹、吴旗、刘家河等18个县(区),于陕西省大荔县三河口东南注入渭河。北洛河流域范围为34°42'N—37°19'N、107°33'E—110°10'E,流域总面积为26 905 km²,河流干流长680.3 km,是陕西省内最长的河流,总落差为1 587 m,海拔为297~1 990 m,平均比降为2.3%。本研究选取北洛河上游志丹、吴旗、刘家河3个水文站以上集水区为研究区(面积分别为774、3 408、7 325 km²),其中刘家河断面以上包含志丹、吴旗集水区(图1)。北洛河上游(刘家河水文站以上)地貌类型属于黄土高原梁峁状丘陵沟壑区,沟壑密度大、地形支离破碎,大部分地区山高坡陡,地势总体为东南低、西北高。

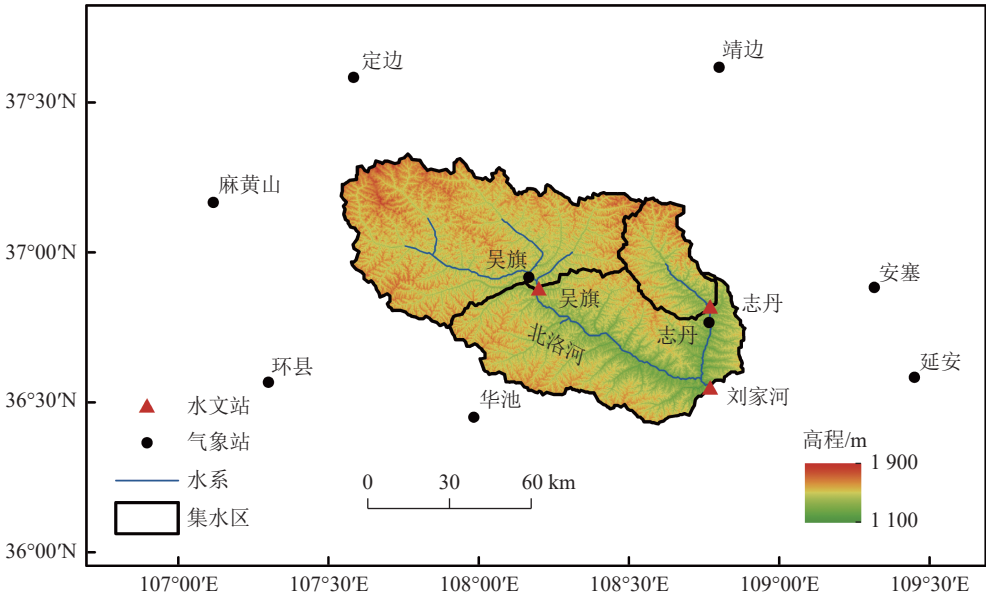


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of study area

1.2 数据来源

1.2.1 气象水文数据

水文资料来源于《黄河流域水文年鉴》中志丹、吴旗、刘家河水文站点1971—2010年的实测径流数据。气象数据来源于国家气象信息中心官网(<https://www.nmic.cn/>),包括1971—2010年吴旗、志丹、华池等9个气象站的日降水、气温等数据,水文站及气象站位置见图1。

1.2.2 遥感数据

遥感数据包括DEM数据、土地利用数据。DEM数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>),空间分辨率为30 m×30 m。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),包括1980年、1990年、2000年和2010年4期数据,空间分辨率为30 m×30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 基流分割方法

采用 Lyne-Hollick 法对研究区 1971—2010 年的河川日径流深数据进行分割以得到日地表径流深及日基流深。该方法由 Lyne 等提出,并由 Nathan 等于 1990 年引入到水文学中用于基流分割,该方法也是适用北洛河流域基流分割最好的方法^[15]。

1.3.2 趋势及突变检验方法

Kendall 秩次相关性检验及 Mann-Kendall(M-K)突变检验方法既不要求样本满足特定的分布,也不需要少量的离群值进行处理,因而它更适合处理类型和顺序变量,且计算方便,常被用于水文气象研究中的时间序列检验^[16]。

1.3.3 土地利用变化分析方法

为探究北洛河上游主要土地类型变化,本研究将面积占比较小的水域、建设用地、未利用土地合并为其他地类,对吴旗、志丹、刘家河 3 个水文站以上集水区的 4 期土地利用数据进行地类面积统计,并分时段计算各地类的面积变化幅度^[17]。

1.3.4 径流及其组分变化归因分析方法

据资料显示,研究区中无大中型灌区,主要以旱地农业为主,农业用水量占比非常小,同时工业和生活用水也较少,占年径流的 5% 以下。此外,研究区内无大中型水利工程,仅有少量淤地坝和小型水库,基本不具备径流调蓄能力^[18]。因此,就研究区而言,主要人类活动是植被恢复,而非梯田与淤地坝建设等水土保持措施以及人类大型取用水活动,进而本研究忽略了其余水土保持措施以及人类取用水对于径流深及其组分较小的影响,将径流深及其组分变化分为气候变化引起和植被恢复引起的部分。

Budyko 水热耦合平衡理论应用。本研究采用基于 Budyko 理论的弹性系数法对径流深进行归因分析,该方法以 Budyko 理论为基础,建立的水量平衡模型能够准确地识别气候与下垫面变化对流域径流变化的影响。Choudhury^[6]基于 Budyko 假设,推导出流域水热耦合平衡方程,表达式如下:

$$R = P - \frac{PE_{T_0}}{(P^n + E_{T_0}^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中: R 为年径流深, mm; P 为年降水量, mm; E_{T_0} 为年潜在蒸散发量, mm, 因缺乏辐射资料, E_{T_0} 采用只需要气温和地理位置数据的 Hargreaves 方法计算^[19]; n 为下垫面特征参数, 与流域土壤、地形、植被等因素相关, 可由多年平均径流深、降水量、潜在蒸散发量代入式(1)反推求得^[20]。

弹性系数计算。径流的弹性定义为单位因素变化引起的流域径流变化程度, 即某一因素变化 1% 引起的年径流相对于多年平均值变化的百分比^[21], 其计算公式如下:

$$\varepsilon_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{R} \quad (2)$$

式中: ε_{x_i} 为径流深对某一特定因素 x_i 的弹性系数。

径流深的降水、潜在蒸散发弹性系数可利用 Choudhury^[6]基于 Budyko 假设提出的流域水热耦合平衡方程估算^[11]; 基流深、地表径流深的降水、潜在蒸散发弹性系数可采用最小二乘法估算^[12]。

贡献率计算。径流深及其组分变化可以分为气候变化引起的和植被恢复引起的部分, 以径流深为例, 可以表示为:

$$\Delta R = R_2 - R_1 \quad (3)$$

$$\Delta R = \Delta R_{CC} + \Delta R_{ER} \quad (4)$$

式中: ΔR 为径流深的变化量, mm; R_1 、 R_2 分别为变化前、后的平均年径流深, mm; ΔR_{CC} 为气候变化引起的径流深变化量, mm; ΔR_{ER} 为植被恢复引起的径流深变化量, mm。

基于偏微分方程, 不同影响因子引起的径流变化量可通过径流对其的偏导数与其变化量的乘积来估计^[7], 则气候变化引起的径流深变化量可表示为

$$dR_{CC} = \frac{\partial f}{\partial P}dP + \frac{\partial f}{\partial E_{T_0}}dE_{T_0}$$

(5)

结合表达式(2), 即可得到 ΔR_{CC} 、 ΔR_{ER} 的计算方法, 如下:

$$\Delta R_{CC} = \varepsilon_P \frac{\Delta P}{\bar{P}} \bar{R} + \varepsilon_{E_{T_0}} \frac{\Delta E_{T_0}}{\bar{E}_{T_0}} \bar{R}$$

(6)

$$\Delta R_{ER} = \Delta R - \Delta R_{CC}$$

(7)

式中: $\bar{R}$ 、 $\bar{P}$ 和 $\bar{E}_{T_0}$ 分别为多年平均径流深、降水量、潜在蒸散发量, mm; ΔP 、 ΔE_{T_0} 分别为降水量、潜在蒸散发量的变化量, mm。

则 ΔR_{CC} 、 ΔR_{ER} 分别与 ΔR 的占比即为贡献率。同理, 气候变化、植被恢复引起的基流深、地表径流深变化量也可由式(6)、式(7)得出, 进而得出气候变化、植被恢复对于基流深、地表径流深变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 径流组分演变趋势分析

研究期内(1971—2010年)3个水文站的径流深变化基本一致, 且均存在突变点。吴旗、志丹、刘家河站以上集水区的径流系数分别从0.08减至0.04、0.03减至0.01、0.14减至0.08, 地表径流分别占总径流的45.4%~56.4%, 其减幅分别为80%、79%、72%。志丹、刘家河站的基流深分别减少了12%、44%, 而吴旗站增加了20%。Kendall秩次相关检验表明, 3站年径流深、年地表径流深均呈显著减少趋势; 年基流深各站变化趋势不一致, 吴旗站显著增加, 刘家河站显著减少, 志丹站减少趋势不显著(表1)。此外, M-K突变点检验表明, 3站年径流深、年基流深、年地表径流深的突变年份均为2002—2003年(表1)。

表1 各水文站1971—2010年年径流深、年基流深、年地表径流深变化趋势分析

Table 1 Analysis of the trend of changes in runoff depth, baseflow depth, and surface runoff depth at various stream gauging stations from 1971 to 2010

水文站	年径流深趋势分析			年基流深趋势分析			年地表径流深趋势分析		
	趋势统计量U	显著性	突变年份	趋势统计量U	显著性	突变年份	趋势统计量U	显著性	突变年份
吴旗	-2.38	*	2003	2.21	*	2002	-3.66	***	2002
志丹	-3.49	***	2003	-1.54	Ns	2003	-3.54	***	2003
刘家河	-2.66	**	2003	-2.91	**	2003	-2.92	***	2003

注: *表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$; ***表示 $P<0.001$; Ns表示不显著。

2.2 土地利用变化

1980—2010年, 北洛河上游林草面积增加, 植被覆盖度显著提高, 特别是在2000—2010年期间。1980—1989年, 研究区林、草地面积占比分别增加-1.0%、0.8%; 1990—1999年, 林、草地面积占比分别增加0.7%、-0.5%; 2000—2010年, 林、草地面积占比分别增加9.7%、5.4%(表2)。2000年以后林草地面积大幅增加与1999年国家实施的退耕还林(草)工程有关。

3站以上集水区林草地面积均显著增加, 吴旗站以上集水区最为显著。1980—2010年期间, 吴旗站以

上集水区林地面积由 1980 年的 99.5 km² 增至 2010 年的 692.8 km²，林地面积占比从 2.9% 增至 20.3%，增加 6 倍，志丹、刘家河站以上集水区林地面积占比分别从 1980 年的 4.9% 和 5.7% 增至 2010 年的 7.6% 和 15.1%，面积增幅分别为 53.5%、165.9%(表 2)。相比于志丹、刘家河站以上集水区，吴旗站以上集水区林地面积增幅最为显著。3 站以上集水区草地面积占比从 1980 年的 54.2%~56.0% 增至 2010 年的 59.7%~62.3%，面积增幅均在 10% 左右；而耕地面积占比从 38.8%~42.7% 减至 19.5%~29.6%(表 2)。

表 2 1980—2010 年各站以上集水区主要土地利用类型年际统计特征

Table 2 Annual statistical characteristics of major land use types in catchment areas above stations from 1980 to 2010

地类	站名	1980年		1990年		2000年		2010年	
		面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
耕地	吴旗	1 455.2	42.7	1 478.2	43.4	1 456.2	42.7	663.8	19.5
	志丹	300.1	38.8	299.9	38.7	299.5	38.7	229.1	29.6
	刘家河	2 883.6	39.4	2 895.3	39.5	2 882.8	39.4	1 764.3	24.1
林地	吴旗	99.5	2.9	78.7	2.3	100.6	3.0	692.8	20.3
	志丹	38.2	4.9	28.9	3.7	38.4	5.0	58.6	7.6
	刘家河	414.6	5.7	347.5	4.7	397.4	5.4	1 102.6	15.1
草地	吴旗	1 847.1	54.2	1 844.1	54.1	1 845.4	54.1	2 033.1	59.7
	志丹	433.3	56.0	442.6	57.2	433.4	56.0	482.0	62.3
	刘家河	4 007.4	54.7	4 063.0	55.5	4 025.8	55.0	4 422.8	60.4
其他	吴旗	6.2	0.2	7.0	0.2	5.7	0.2	18.2	0.5
	志丹	2.5	0.3	2.7	0.3	2.7	0.3	4.3	0.6
	刘家河	19.5	0.3	19.3	0.3	19.0	0.3	35.4	0.5

2.3 径流深组分演变归因分析

为量化气候因素及人类活动对径流影响的贡献，以径流深、基流深、地表径流深突变年份为界，将整个研究期划分为基准期(P1，径流深为 1971—2003 年；基流深、地表径流深吴旗站以上集水区为 1971—2002 年，其余为 1971—2003 年)、植被恢复影响期(P2，径流深为 2004—2010 年；基流深、地表径流深吴旗站以上集水区为 2003—2010 年，其余为 2004—2010 年)，采用弹性系数法计算降水、潜在蒸散发及植被恢复对于径流深及其组分变化的贡献率(表 3)，贡献率的符号反映了影响因子(气候和植被恢复)的变化对径流深及其组分变化的影响方向，贡献率为正代表起正向作用、为负代表起负向作用。

3 站以上集水区植被恢复影响期相对于基准期的降水量是减少的，且降水变化对于吴旗站基流深增加的贡献率为负值(表 3)，表明降水的减少对于吴旗站基流深的增加起到的是负向作用；而降水变化对于志丹、刘家河站基流深减少的贡献率为正值，表明降水的减少对于基流深的减少起到的是正向作用。基流的主要来源是降水的入渗补给，当降水量减少时，地下水的补给量也会减少，从而导致基流深减少。同时，植被根系可以增强地表裂隙发育程度，且地表腐殖层可以大幅度减缓形成地表径流的时间，使降水更多地渗入地下，进而补给基流^[12]。因此，3 站基流深的变化受到降水减少基流补给以及植被增加入渗和补给两方面的共同影响。同时降水过程、地形等条件也会影响基流补给，进而出现不同站以上集水区的基流深变化趋势不一致的现象。

总体上来看，植被恢复是 3 站径流深、基流深、地表径流深变化的主要驱动因素，贡献率均大于

50%(表3)。归因分析发现, 植被恢复对吴旗站径流深及其组分变化的贡献率显著大于志丹、刘家河站, 其原因在于吴旗站以上集水区2010年的林地面积占比最大, 为20.3%(表2), 植被恢复状况最好。气候因素中潜在蒸散发对吴旗站径流深减少的贡献率大于降水, 而另2站相反, 说明林草地恢复程度越高, 流域潜在蒸散发越高, 对于径流的影响越大。降水对于志丹站基流深减少的贡献率最高, 这可能与其地形地貌特征有关。志丹站以上集水区沟壑密度为3.3 km/km², 明显大于另2站以上集水区^[22], 沟壑越多对降水入渗的影响越大, 在研究期内降水呈减少的情况下, 基流的补给程度将会减小。

表3 各站以上集水区径流深及其组分变化的归因分析结果

径流组分		与基准期相比变化			弹性系数		气候因子影响						植被恢复影响		
	站名	$\Delta P/\text{mm}$	$\Delta E_{T_0}/\text{mm}$	$\Delta R/\text{mm}$	ε_P	$\varepsilon_{E_{T_0}}$	$\Delta R_P/\text{mm}$	$C_P/\%$	$\overline{C}_P/\%$	$\Delta R_{E_{T_0}}/\text{mm}$	$C_{E_{T_0}}/\%$	$\overline{C}_{E_{T_0}}/\%$	$\Delta R_L/\text{mm}$	$C_L/\%$	$\overline{C}_L/\%$
径流深	吴旗	-32.63	81.61	-10.38	0.17	-0.73	-0.31	3.0		-1.37	13.2		-8.70	83.8	
	志丹	-74.19	32.46	-5.83	1.79	-0.79	-2.28	39.1	18.9	-0.20	3.4	8.4	-3.35	57.5	72.7
	刘家河	-47.11	38.06	-29.41	0.73	-1.63	-4.26	14.5		-2.51	8.5		-22.64	77.0	
基流深	吴旗	-12.36	66.62	0.42	0.17	0.77	-0.05	-11.0		0.04	10.4		0.42	100.7	
	志丹	-74.19	32.46	-1.18	0.69	-2.21	-0.33	28.1	10.7	-0.21	17.6	14.8	-0.64	54.4	74.5
	刘家河	-47.11	38.06	-6.24	0.30	-0.90	-0.94	15.0		-1.03	16.6		-4.27	68.4	
地表径流深	吴旗	-12.36	66.62	-10.14	1.38	-3.28	-1.03	10.1		-1.48	14.6		-7.63	75.2	
	志丹	-74.19	32.46	-4.65	1.84	-3.52	-1.46	31.5	19.3	-0.54	11.7	13.6	-2.64	56.9	67.2
	刘家河	-47.11	38.06	-23.17	1.24	-3.00	-3.74	16.2		-3.32	14.3		-16.10	69.5	

注: ΔR_P 、 $\Delta R_{E_{T_0}}$ 、 ΔR_L 分别为降水、潜在蒸散发、植被恢复引起的径流深、基流深、地表径流深的变化量; $\overline{C}_P$ 、 $\overline{C}_{E_{T_0}}$ 、 $\overline{C}_L$ 分别为降水、潜在蒸散发、植被恢复对于3站径流深、基流深、地表径流深变化的平均贡献率。

3 讨 论

植被可以通过影响土壤结构、地表蒸散发、入渗等改变流域的产汇流过程, 进而影响河川径流量。目前有关植被恢复对径流(或基流)的影响均出现了造林会减少、增加或不影响径流(或基流)3种截然不同的结论^[12]。本研究表明, 1999年实施的退耕还林还草工程导致了位于半干旱区的北洛河上游径流深显著减少, 气候变化(降水、潜在蒸散发)的影响较小, 这与前人在黄河中游地区的研究结果基本一致^[13-14,23]。本研究采用基于Budyko理论的弹性系数法计算得出植被恢复对于北洛河上游径流深减少的平均贡献率为73%(表3), 姜泓旭等^[24]、毕早莹等^[25]在与北洛河上游流域气候类型、地貌类型相似的孤山川流域、窟野河流域的分析认为, 植被恢复对于径流减少的贡献率为85%左右, 与本研究结果基本相同。植被恢复对于吴旗站基流深、地表径流深变化的贡献率大于志丹、刘家河站(表3), 这可能是因为吴旗站以上集水区植被恢复状况最好, 更高水平的植被恢复可能导致更高的径流组分响应^[12]。

流域地表径流往往显著影响洪水过程, 而基流是维持河流生态系统健康的重要组分, 也是河流水资源持续开发利用的重要来源。本研究发现植被恢复显著减少地表径流, 同时大量研究表明在干旱和半干旱区植被恢复不仅减少地表径流, 还可明显削减洪峰流量^[26]; 本研究中植被恢复与基流的关系不一致, 对于植被恢复较好的吴旗站基流呈增加趋势, 但地表径流决定了总径流的减少趋势, 而基流变化对总径流的影响甚微。植被恢复在减少地表径流的同时若增加了基流, 则可以提高河流的常水位, 对于河流生态系统保护和河川径流的开发利用具有积极意义。因此后期应加强植被恢复对地表径流、基流的影响机制的深入研究, 从河流生态和水资源开发等方面提出流域植被恢复的科学建议。

本研究中主要的土地利用变化是耕地转变为林地与草地,且林地增幅更为明显。这主要是由于1999年国家提出的退耕还林(草)政策,并在该区大规模实施。据统计,黄土高原地区自退耕还林(草)政策实施以后,植被覆盖度显著增加近1倍,同时河川径流锐减^[27]。研究表明,受全球变化影响,该区气温持续升高,极端干旱和暴雨事件呈增加趋势^[28],极端水文事件势必对流域径流及其组分产生重要影响,特别是极端降雨事件可能会增加基流的补给^[29]。

Budyko理论可以将流域内复杂的水文过程简化为水分状况(降水量)和能量状况(潜在蒸散发量)之间的平衡关系,并且将气候条件(潜在蒸散发量)与实际蒸散发和降水量建立函数关系,该方法已在不同地形地貌、气候区得到了广泛使用^[13]。该方法的核心是确定流域潜在蒸散发量,虽然目前已建立了以彭曼公式为代表的多种计算模型^[25],但针对不同气候、地形、植被类型与生长阶段的潜在蒸散发确定仍需加强。此外,本研究径流序列为1971—2010年,土地利用数据的空间分辨率是30 m×30 m。该区大规模植被恢复发生于1999年,研究发现径流的突变点发生在2002—2003年,因此径流数据的时间跨度可以有效覆盖植被恢复的前后期。更高空间分辨率的植被覆盖度数据有助于精确识别植被的空间分布进而确定其潜在蒸散发,从而提高结果的准确性。同时,基于Budyko理论的弹性系数法的前提是所有变量之间相互独立,而现实中气候系统和流域下垫面是一个整体,气候因素与下垫面因素相互影响,会使模型产生一定误差,后期可考虑引入修正参数来提高模型的准确性。

4 结 论

本研究系统分析了植被恢复和气候因素(降水、潜在蒸散发)对吴旗、志丹、刘家河水文站以上集水区径流深及其组分变化的贡献。主要结论如下:

(1)1971—2010年期间,吴旗、志丹、刘家河水文站年径流深、地表径流深均呈显著减少趋势,基流深除吴旗站呈显著增加趋势外,其余均减少。径流深各组分突变点均出现在大规模退耕还林(草)工程实施后的2002—2003年,说明了植被恢复对径流影响的重要性。自1999年退耕还林(草)工程实施以来,北洛河上游林草面积大幅增加,吴旗站以上集水区植被恢复状况最好,刘家河次之,志丹最差。植被恢复是导致3站以上集水区径流深、基流深、地表径流深减少(吴旗站基流深为增加)的主要因素,平均贡献率分别为73%、74%、67%,且植被恢复程度越好,对径流深及其组分变化的影响越大,而降水、潜在蒸散发的影响次之。

(2)植被恢复通过增加地表覆盖来增加降水入渗,从而减少地表径流,导致北洛河上游地表径流深呈显著减少趋势。在半干旱的黄土区,植被恢复后植物的蒸腾作用增强,流域蒸散发的增加导致总径流减少,而对于土层深厚的黄土区基流的补给机制尚未形成统一认识,可能与流域的地形地貌(沟壑密度、坡度等因素)及植被根系导致的优先流补给有关。

参考文献:

- [1] HOU Y P, ZHANG M F, WEI X H, et al. A comparison of annual streamflow sensitivities to vegetation change and climate variability in fourteen large watersheds along climate zones in China[J]. CATENA, 2024, 234: 107571.
- [2] 王紫荆, 徐梦珍, 胡宏昌, 等. 1982—2020年黄河流域植被变化特征及驱动因素[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 499-509. (WANG Z J, XU M Z, HU H C, et al. Characteristics of vegetation changes and their drivers in the Yellow River basin from 1982 to 2020[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 499-509. (in Chinese))
- [3] 夏岩, 张姝琪, 高文冰, 等. 黄土高原变绿对黄河中游延河流域径流演变的影响估算[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(6): 849-860. (XIA Y, ZHANG S Q, GAO W B, et al. Influence of greening Loess Plateau on streamflow change in Yanhe River basin of the Middle Yellow River, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(6): 849-860. (in Chinese))

- [4] 徐宗学,班春广,张瑞.雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J].水科学进展,2022,33(4):519-530.(XU Z X, BAN C G, ZHANG R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(4): 519-530. (in Chinese))
- [5] BUDYKO M I. Climate and life[M]. New York: Academic Press, 1974: 508.
- [6] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [7] YANG H B, YANG D W, LEI Z D, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3): W03410.
- [8] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. [Water Resources Research](#), 2001, 37(3): 701-708.
- [9] 孙莉茹,毕华兴,马志瑾,等.1951—2020年黄河上中游径流变化特征及归因分析[J].北京林业大学学报,2024,46(1):82-92.(SUN L R, BI H X, MA Z J, et al. Runoff variation characteristics and attribution analysis of the upper and middle reaches of the Yellow River from 1951 to 2020[J]. [Journal of Beijing Forestry University](#), 2024, 46(1): 82-92. (in Chinese))
- [10] BERGHUIJS W R, LARSEN J R, van EMMERIK T H M, et al. A global assessment of runoff sensitivity to changes in precipitation, potential evaporation, and other factors[J]. [Water Resources Research](#), 2017, 53(10): 8475-8486.
- [11] LIANG W, BAI D, WANG F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. [Water Resources Research](#), 2015, 51(8): 6500-6519.
- [12] 夏露,杨晶,马耘秀,等.植被恢复和气候变化对汾河源区径流及其组分的影响[J].生态学报,2024,44(11):4597-4608.(XIA L, YANG J, MA Y X, et al. Impacts of vegetation restoration and climate change on runoff and its components in the source area of the Fenhe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4597-4608. (in Chinese))
- [13] 薛帆,张晓萍,张檐,等.基于Budyko假设和分形理论的水沙变化归因识别:以北洛河流域为例[J].地理学报,2022,77(1):79-92.(XUE F, ZHANG X P, ZHANG L, et al. Attribution recognition of streamflow and sediment changes based on the Budyko hypothesis and fractal theory: a case study in the Beiluo River basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 79-92. (in Chinese))
- [14] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等.生态恢复对流域水沙演变趋势的影响:以北洛河上游为例[J].生态学报,2015,35(3):622-629.(LIU E J, ZHANG X P, XIE M L, et al. Hydrologic responses to vegetation restoration and their driving forces in a catchment in the loess hilly-gully area: a case study in the Upper Beiluo River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 622-629. (in Chinese))
- [15] 吴珍妮,穆兴民,高鹏,等.北洛河上游基流分割适宜性方法及基流特征[J].人民黄河,2019,41(3):94-99.(WU Z N, MU X M, GAO P, et al. Baseflow separation and characteristic analysis of the upstream of Beiluo River basin[J]. [Yellow River](#), 2019, 41(3): 94-99. (in Chinese))
- [16] 胡广录,陶虎,焦娇,等.黑河中游正义峡径流变化趋势及归因分析[J].干旱区研究,2023,40(9):1414-1424.(HU G L, TAO H, JIAO J, et al. Runoff trend and attribution analysis of the Zhengyi Gorge in the middle reaches of the Heihe River[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(9): 1414-1424. (in Chinese))
- [17] 杜洲,牛健植,樊登星,等.基于PLUS模型的黄河中游多沙粗沙区土地利用变化模拟及驱动力分析[J].水土保持研究,2024,31(6):309-318.(DU Z, NIU J Z, FAN D X, et al. Simulation and driving force analysis of land use change in the sandy coarse region of the middle reaches of the Yellow River based on PLUS model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 309-318. (in Chinese))
- [18] 陈攻君,穆兴民,高鹏,等.北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J].中国水土保持科学,2018,16(6):1-8.(CHEN M J, MU X M, GAO P, et al. Characteristics and driving factors of runoff changes in the upper reach of the Beiluo River basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(6): 1-8. (in Chinese))
- [19] HARGREAVES G H, SAMANI Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. [Applied Engineering in Agriculture](#), 1985, 1(2): 96-99.
- [20] 杨斐,鹿化煜,吴会娟,等.毛乌素沙地年均水蚀量估算[J].地理学报,2024,79(3):635-653.(YANG F, LU H Y, WU H J, et al. Estimation of annual water erosion sediments in Mu Us sandy land based on remote sensing images and coupled water-energy balance equation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(3): 635-653. (in Chinese))
- [21] 师卫钊,何毅,邵伟婷.嘉陵江上游径流变化及其影响因素归因分析[J].水土保持学报,2023,37(3):124-131.(SHI W Z, HE Y, SHAO Y T. Attribution analysis of runoff change and its influencing factors in the upper reaches of Jialing River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 124-131. (in Chinese))

- [22] 王帅帅, 骆建文, 李喜安, 等. 陕北黄土高原工程地质分区研究以志丹县为例[J]. 工程地质学报, 2016, 24(s1): 1395-1400. (WANG S S, LUO J W, LI X A, et al. Engineering geological zoning of Loess Plateau of Northern: a case study of Zhidan County[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(s1): 1395-1400. (in Chinese))
- [23] 谢剑, 高鹏, 穆兴民, 等. 近 80 年来北洛河流域径流变化特征及其归因分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 122-128. (XIE J, GAO P, MU X M, et al. Variation characteristics of runoff in Beiluo River basin over the past 80 years and its attribution analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 122-128. (in Chinese))
- [24] 姜泓旭, 田鹏, 穆兴民, 等. 不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 86-92, 215. (JIANG H X, TIAN P, MU X M, et al. Variation and driving factor of flow-sediment relationship in Gushanchuan River basin at different time scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 86-92, 215. (in Chinese))
- [25] 毕早莹, 李艳忠, 林依雪, 等. 基于 Budyko 理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 61-71. (BI Z Y, LI Y Z, LIN Y X, et al. Quantitative assessment on the effects of vegetation changes on runoff based on Budyko theory in the Kuyehe River basin of Northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 61-71. (in Chinese))
- [26] GUO X X, DU M, GAO P, et al. Response of runoff-sediment processes to vegetation restoration patterns under different rainfall regimes on the Loess Plateau[J]. CATENA, 2024, 234: 107647.
- [27] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616. (YAO W Y, RAN D C, CHEN J N. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 607-616. (in Chinese))
- [28] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9. (NING Z, GAO G Y, FU B J. Changes in streamflow and sediment load in the catchments of the Loess Plateau, China: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 2-9. (in Chinese))
- [29] THOMAS B, BEHRANGI A, FAMIGLIETTI J. Precipitation intensity effects on groundwater recharge in the Southwestern United States[J]. Water, 2016, 8(3): 90.

Quantifying the impact of vegetation restoration on runoff components in the upper Beiluohe River basin*

PAN Chengzhong¹, CHEN Tianyue¹, CHAO Zhilong², LI Ping³

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. The Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Shannxi Province, Xi'an 710086, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Quantitative contribution of vegetation restoration and climate change to changes in runoff and its components is largely unknown in semi-arid loess areas. The effect of vegetation restoration and climate change on runoff and its components was evaluated using the elasticity coefficient method for the Beiluohe River at Wuqi, Zhidan, and Liujiahe stream gauging stations. Surface and total runoff showed significant decreasing trends at these three stations from 1971 to 2010, surface runoff accounts for 45% to 56% of total runoff; abrupt changes all occurred around 2002—2003. Changes in baseflow on the other hand were not consistent among the three stations. Forest and grassland areas in the upper Beiluohe River basin has increased by 15.1% since 1999. Contributions of vegetation restoration, precipitation, and the potential evapotranspiration to the reduction in total runoff at the three stations were 73%, 19%, and 8%, respectively, on average; and the average contribution to changes in surface runoff were 67%, 19%, and 14%, respectively. The greater the extent of vegetation restoration, the greater its contribution to changes in runoff. Vegetation restoration can significantly reduce surface runoff and total runoff, but may increase the baseflow at the same time. This research has implications for developing and managing water resources for the region.

Key words: changes in runoff; vegetation restoration; driving factors; baseflow; upper Beiluohe River basin

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.42077059).