

DOI: 10.5846/stxb202002290372

徐志鹏, 刘文飞, 沈芳芳, 段洪浪, 吴建平, 陈官鹏, 徐晋. 基于扩展的 Budyko 模型定量评估平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8783-8793.

Xu Z P, Liu W F, Shen F F, Duan H L, Wu J P, Chen G P, Xu J. Quantitative assessment on the effects of reforestation and climate variability on the seasonal streamflow in Pingjiang watershed using the extended Budyko model. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8783-8793.

基于扩展的 Budyko 模型定量评估平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的影响

徐志鹏¹, 刘文飞^{1,*}, 沈芳芳¹, 段洪浪¹, 吴建平^{2,3}, 陈官鹏¹, 徐 晋¹

¹ 南昌工程学院江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室, 南昌 330099

² 云南大学生态与环境学院, 昆明 650500

³ 云南省植物繁殖适应与进化生态学重点实验室, 昆明 650500

摘要:流域季节性径流变化反映了年内水资源的动态特征。在以森林为主的流域中, 森林变化和气候变异被普遍认为是影响流域水文过程的两大驱动因素。因此在全球气候变化背景下, 研究流域森林恢复和气候变异对流域季节性径流的影响, 可为协调区域碳—水关系和制订可持续的森林经营管理策略提供参考。选择鄱阳湖流域上游的平江流域为研究对象, 根据流域历史森林覆盖率变化情况, 将研究期划分为参考期(1961—1985)和森林恢复期(1986—2006), 采用 Mann-Kendall 趋势分析研究流域长时期水文气象数据是否存在显著变化趋势。同时引入月干旱指数(潜在蒸散发和有效降雨的比率), 将一年定义为能量限制季(1—6月)和水分限制季(7—12月), 结合扩展的 Budyko 模型定量分析平江流域森林恢复和气候变异对季节性径流的相对贡献。在本研究流域整个研究期内(1961—2006), 通过 Mann-Kendall 趋势分析发现, 研究流域水分限制季径流呈现显著增加趋势, 而能量限制季水文和气候变量变化趋势均不显著。其次, 相较于参考期, 流域森林恢复使能量限制季径流降低了 11.71 mm/a(24.40%), 使水分限制季径流增加了 12.27 mm/a(17.23%)。同时, 气候变异导致能量限制季径流减少了 36.28 mm/a(75.60%), 而使水分限制季径流增加了 58.94 mm/a(82.77%)。上述研究结果表明, 森林恢复对径流影响具有累积效应。森林恢复对季节性径流具有积极的调节作用, 同时季节性径流对森林恢复的响应存在时间差, 而且森林恢复对径流的影响在能量限制季和水分限制季具有相互抵消的作用, 气候变异与森林恢复的影响效应类似。此外, 本研究也证实, 平江流域季节性径流变化主要是受气候变化主导, 但森林恢复对季节性径流的贡献也不容忽视。

关键词: Budyko 模型; 森林恢复; 气候变异; 径流

Quantitative assessment on the effects of reforestation and climate variability on the seasonal streamflow in Pingjiang watershed using the extended Budyko model

XU Zhipeng¹, LIU Wenfei^{1,*}, SHEN Fangfang¹, DUAN Honglang¹, WU Jianping^{2,3}, CHEN Guanpeng¹, XU Jin¹

¹ Jiangxi Key Laboratory for Restoration of Degraded Ecosystems & Watershed Ecohydrology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China

² School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China

³ Yunnan Key Laboratory of Plant Reproductive Adaption and Evolutionary Ecology, Kunming 650500, China

Abstract: The seasonal changes of streamflow in the watershed reflect the dynamic characteristics of water resources within a year. In forested watersheds, it is generally accepted that forest cover change and climate variability are considered as two critical driving factors to affect hydrological processes. Thus, quantifying the effects of reforestation and climate variability on seasonal streamflow dynamics provides scientific basis for balancing regional carbon and water resources and developing

基金项目:江西省教育厅科技计划项目(GJJ151141); 国家自然科学基金项目(31660234, 31760111); 江西省杰出青年基金项目(20192BCBL23016)

收稿日期:2020-02-29; **网络出版日期:**2020-10-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuwf729@126.com

sustainable forest management strategies in the context of global climate change. The Pingjiang watershed, which is located in the upper reach of Poyang Lake basin in subtropical China, was selected for this study. The entire study period consists of the reference period (1961—1985) and the reforestation period (1986—2006), based on the history of forest coverage dynamics. The method of Mann-Kendall trend analysis was used to detect whether trends in the hydroclimatic variables significantly varied over a long-term period. Meanwhile, the monthly aridity index (the ratio of potential evapotranspiration to effective precipitation) was applied to define two different seasons within a year as energy-limited season (January—June) and water-limited season (July—December), respectively. The extended Budyko model was used to quantify the relative contribution of reforestation and climate variability to the seasonal changes of streamflow in the studied watershed. First, based on Mann-Kendall method, streamflow in the water-limited season showed a significant increasing trend during the study period (1961—2006), but with no significant trend in hydrological and climatic variables for the energy-limited season. Second, reforestation decreased streamflow in the energy-limited season by 11.71 mm/a (24.40%), but increased that in the water-limited season by 12.27 mm/a (17.23%) compared with the reference period. By contrast, climate variability related streamflow was reduced by 36.28 mm/a (75.60%) in the energy-limited season but was increased by 58.94 mm/a (82.77%) in the water-limited season. These results demonstrated that effects of reforestation on streamflow can be cumulative over time and space. Reforestation had a positive role in regulating seasonal streamflow dynamics, while there could be a time-lag for the response of seasonal streamflow to reforestation. The effects of reforestation on streamflow was offset between the energy limited and water limited seasons, and the effects of climate variability on streamflow was similar with those of reforestation. Meanwhile, these results also demonstrated that the seasonal changes of streamflow in the Pingjiang watershed are primarily determined by climate change. However, reforestation may be another important driving force to affect seasonal streamflow variation.

Key Words: Budyko model; reforestation; climate variability; streamflow

森林资源管理与流域水文循环的关系一直是森林水文领域重点关注的问题^[1-4]。在森林流域中,森林变化和气候变异被普遍认为是影响流域水文过程的两大驱动因素^[5-7]。森林生态系统作为陆地生态系统中不可或缺的组成部分,在固碳和减少温室气体排放方面具有重要作用,从而能够有效的减缓气候变化对生态系统的影响^[8-9]。因此,近几十年来大规模的造林已经成为各国在应对全球气候变化的主要途径之一^[10]。然而,如此大规模的造林是否对水资源产生了影响,学术界还存在较大的争议^[4, 11-12],尤其在气候变化背景下,开展此类研究可以为制订科学的碳-水战略提供参考。

目前,国内外关于森林变化和气候变异对流域径流的影响结果已经取得了一些进展^[3, 13-15]。一般的结论是造林减少径流量,森林采伐可以增加径流量,而气候变异与森林植被的水文效应往往存在相互抵消的作用^[6, 14],但这些结论大多是基于年际尺度上来分析径流对森林变化和气候变异的响应。然而,由于流域气候条件和森林植被的年内变化波动,如降雨的季节性变化,植被生长的季节性变化等,会产生不同的季节性水文响应^[16]。因此,在年际尺度上研究森林变化和气候变异对径流的影响并不能完全反映出径流的年内响应特征。探讨森林恢复和气候变异对季节性径流的相对贡献,尤其是在大尺度流域中($>1000 \text{ km}^2$)的研究对于了解区域水资源的年内动态及其影响机制具有十分重要的作用。

在以往的研究中,“准配对”流域法、敏感性分析法、累积双曲线法、时间趋势法、Budyko 模型以及水文模型等方法被广泛的运用在分析森林变化和气候变异对径流的影响中^[17]。然而,这些方法用来评估季节性径流有其局限性。如“准配对”流域法很难运用到大尺度的流域中,因为在实际运用中很难找到气候、地形、土壤等特征十分相似的两个流域。因此,近年来 Budyko 模型被进一步扩展并应用到季节尺度流域径流变化的研究中^[18-21]。该方法是基于水热耦合平衡关系,从水分和能量角度来探讨气候和下垫面条件对流域径流的影响^[22-23]。此外,目前大多数研究是基于该方法分析人类活动(如灌溉、水库蓄水等)对季节性径流的影

响^[18],但在以森林为主的流域中,Budyko 模型运用在分析森林植被变化对季节性径流的影响研究却十分有限。

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,其水资源变化对流域生态系统稳定性至关重要^[24]。自建国初期以来,鄱阳湖流域森林覆盖率发生了巨大的变化,先是经历了大规模的森林采伐,森林覆盖率从 60%下降至 30%左右,随后由于近年来实施的一系列大规模的生态恢复工程,鄱阳湖流域森林覆盖率上升至 70%左右。然而,大规模的植树造林对流域季节性径流产生了何种影响还知之甚少。基于以上分析,本文选择鄱阳湖上游的平江流域为研究对象,利用扩展的 Budyko 模型定量分析森林恢复和气候变异对平江流域季节性径流的影响,为制订可持续的森林经营管理策略提供参考。

1 研究区概况

平江流域位于鄱阳湖上游,流域面积 2689.2 km²。河源和河口地理坐标分别为 115°46' E,26°38' N 和 115°08' E,25°57' N(图 1)。流域地貌主要以丘陵为主,平均海拔为 298 m。土壤类型以山地红壤和黄红壤为主。流域坡度主要介于 8°至 35°之间,占流域面积的 84.66%。平江流域属于典型的亚热带季风湿润区,多年平均降雨量为 1575 mm,多年平均气温为 18.98℃,多年平均径流量为 848 mm。主要土地利用类型为林地、农业用地、草地以及城市建设用地等。主要的植被类型为人工针叶林和亚热带常绿阔叶林,主要树种包括罗浮锥(*Castanopsis fabri*)、木荷(*Schima superba*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、油茶(*Camellia oleifera* Abel)等^[25-26]。

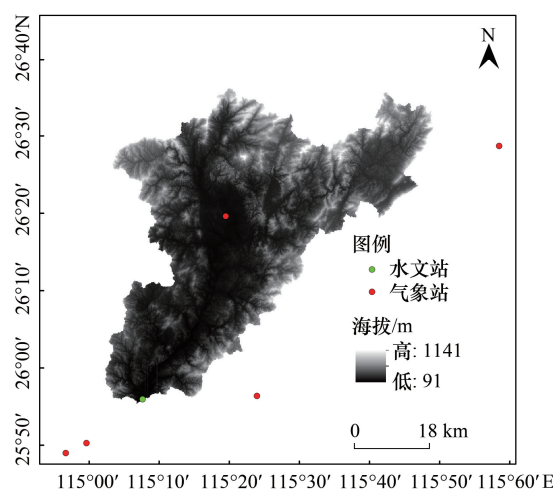


图 1 研究流域地理位置

Fig.1 The location of the study watershed

2 研究方法

2.1 数据来源

研究流域逐日径流数据来自于翰林桥水文站,数据序列长度为 46 年(1961—2006 年);气象数据来自于江西省气候中心,由位于平江流域周边 5 个国家气象站,通过气候数据曲面拟合的 ANUSPLIN 空间插值软件生成气候变量的空间插值^[27-28],整合得到了研究期间的气象数据,其数据序列长度为 1961 至 2006 年,主要包括日降雨、日平均温度、日最高温度、日最低温度(图 2)。以上数据均无缺失数据。

研究流域森林覆盖数据来自于江西省赣州市林业局,其数据序列长度为 1961 至 2006 年。该流域森林覆盖率在 1961 至 1985 年间,波动较小。而自 1985 年开始,流域森林覆盖率从 40%左右迅速上升到 70%以上,并一直保持相对稳定。根据 Liu 等^[26]在同一流域的研究,现将流域森林变化分为 2 个子时期:1961—1985 年为参考期;1986—2006 年为森林恢复期。

2.2 扩展的 Budyko 模型

本研究是基于水热平衡理论的 Budyko 模型来量化森林变化和气候变异对季节性径流的影响,该假设认为流域实际蒸散发(ET)主要是由能量和水分条件共同限制^[29],同时认为在年尺度上流域储水量变化为 0。然而,在季节尺度上,如在水分限制的季节,流域储水量会被消耗,而在能量限制季节则会由于大量降雨得到补给,从而引起流域储水量波动较大^[18]。因此,研究季节性径流变化必须要考虑流域储水量(ΔS)的变化^[18,30]。基于此,Chen 等^[30]引入了有效降水($P-\Delta S$)运用在扩展的 Budyko 模型上。扩展的 Budyko 模型形式如下:

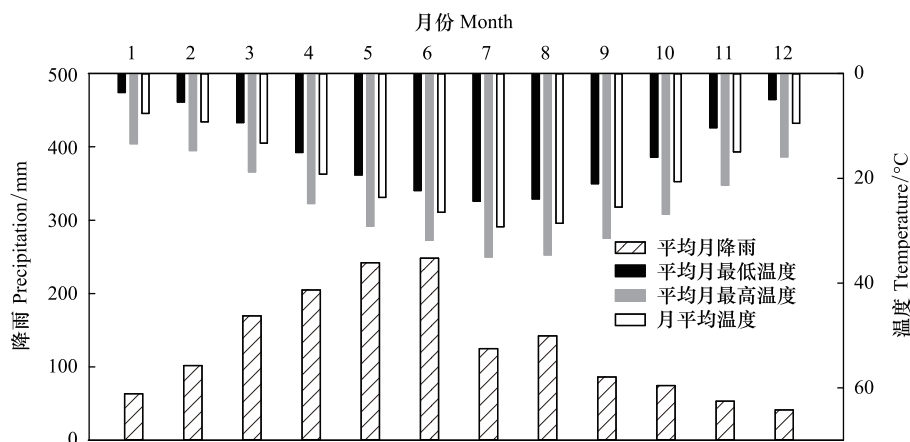


图2 研究流域 1961—2006 年气候因素变化

Fig.2 The climate factors change in the study watershed from 1961 to 2006

$$\Delta S = P - ET - Q \quad (1)$$

$$\frac{ET}{P - \Delta S} = \left\{ 1 + \left(\frac{PET}{P - \Delta S} - A \right)^{-n} \right\}^{-\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式中, PET 和 ET 利用 Hargreaves^[31] 和基于水量平衡关系修正的 Budyko 公式^[32] 来计算:

$$PET = 0.0023 \times Ra \times \left[\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right] \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \quad (3)$$

$$ET = P \times \frac{\left[1 + w \left(\frac{PET}{P} \right) \right]}{\left[1 + w \left(\frac{PET}{P} \right) + \frac{P}{PET} \right]} \quad (4)$$

式中, Q 为流域径流量, ET 为实际蒸散发, P 为降雨, ΔS 为流域储水量 (土壤蓄水量和地下水蓄水量之和), $P - \Delta S$ 为有效降水, 能够反映流域可用降水量, PET 为潜在蒸散发, $\frac{PET}{P - \Delta S}$ 为季节性干旱指数, w 为植物水分利用系数^[32]; Ra 为大气辐射, $T_{\max}$ 为月平均最高温度, $T_{\min}$ 为月平均最低温度。 A 为季节性干旱指数的下限, n 是表示流域特征如植被、土壤和地形等对降雨影响的参数, 决定了 Budyko 曲线的形状。详细描述过程及计算步骤见参考文献 Chen 等^[30] 和 Xin 等^[18]。

如扩展的 Budyko 模型示意图所示 (图 3), 在季节尺度下, $\frac{PET}{P - \Delta S}$ 主要是由于气候变异所引起的, 而 $\frac{ET}{P - \Delta S}$ 则是由气候变异和人类活动 (本研究人类活动主要为森林恢复) 共同引起的。根据扩展的 Budyko 模型假设, 在没有森林变化影响的情况下, 如果气候条件从 M 点 ($\frac{PET1}{P1 - \Delta S1}$) 变化为一个新的状态, N 点 ($\frac{PET2}{P2 - \Delta S2}$), 那么蒸发比也同样会从 M 点 ($\frac{ET1}{P1 - \Delta S1}$) 变成一个新的状态, N 点 ($\frac{ET2}{P2 - \Delta S2}$), 遵循着 Budyko 曲线。这种假设被认为是合理的, 因为在没有其他因素干扰的情况下, Budyko 曲线形状在很大程度上取决于流域特征, 尤其是植被特征^[33-34]。但是, 如果从 M 点 ($\frac{PET1}{P1 - \Delta S1}, \frac{ET1}{P1 - \Delta S1}$) 变化为一个新的状态, G 点 ($\frac{PET2}{P2 - \Delta S2}, \frac{ET3}{P2 - \Delta S2}$), 那么该影响不仅是由气候变异引起的, 同时也受到了森林变化的影响。则森林变

化和气候变异引起径流变化的影响可以计算为:

$$\Delta Q_f = (P2 - \Delta S2) \left(\frac{ET3}{P2 - \Delta S2} - \frac{ET2}{P2 - \Delta S2} \right) \quad (5)$$

$$\Delta Q_c = \Delta Q - \Delta Q_f \quad (6)$$

$$\Delta Q = Q_R - Q_r \quad (7)$$

森林变化和气候变异对径流的相对贡献为:

$$\Delta Q_{fr} = \frac{|\Delta Q_f|}{|\Delta Q|} \times 100\%, \quad \Delta Q_{cr} = \frac{|\Delta Q_c|}{|\Delta Q|} \times 100\% \quad (8)$$

式中, ΔQ_f 为森林变化引起的径流变化量, ΔQ_c 是由气候变异引起的径流变化量, ΔQ 是森林恢复期径流 (Q_R) 和参考期径流 (Q_r) 之差, ΔQ_{fr} 和 ΔQ_{cr} 分别为森林变化和气候变异对径流的相对贡献。具体的计算步骤详见 Xin 等^[18]。

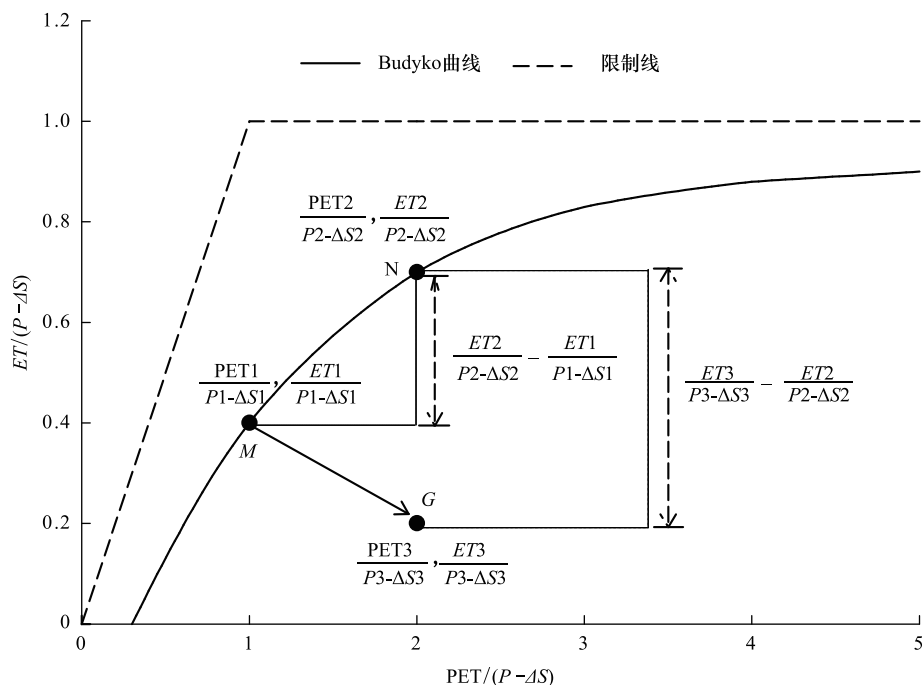


图3 Budyko 模型示意图

Fig.3 Schematic of Budyko model

P : 降雨 Precipitation; ET : 蒸散发 Evapotranspiration; PET : 潜在蒸散发 Potential evapotranspiration; ΔS : 蓄水量变化 Change of water storage

2.3 季节性定义

由于流域气候条件和植被特征的季节性变化,基于扩展的 Budyko 模型,需要对一年中的能量限制和水分限制季节进行划分。Chen 等^[30]通过引入月干旱指数 A_m 来定义能量限制和水分限制月份,当 $A_m < 1$ 时为能量限制月份,当 $A_m \geq 1$ 时为水分限制月份。由于每个年份能量限制和水分限制月份有所变化,因此,通过多年平均月干旱指数 ($\bar{A}_m$) 使整个研究期内每年的能量限制和水分限制月份相同,计算方法如下:

$$\bar{A}_m = \frac{\overline{PET}_m}{\bar{P}_m - \Delta \bar{S}_m} \quad (9)$$

式中, $\bar{A}_m$ 、 $\overline{PET}_m$ 、 $\bar{P}_m$ 、 $\Delta \bar{S}_m$ 多年平均月干旱指数、月潜在蒸发散、月降雨和月储水量变化。

随后根据公式(9)计算得到的研究期内的能量限制和水分限制月份,不同季节月份数据累加得到每年能量限制和水分限制季节值,再根据季节值计算季节干旱指数,当季节干旱指数小于 1 时,为能量限制季节,当

季节干旱指数大于或等于 1 时,为水分限制季节。其计算如下:

$$PET_w = \sum_{i=1}^{n_w} PET_{mwi}, P_w = \sum_{i=1}^{n_w} P_{mwi}, \Delta S_w = \sum_{i=1}^{n_w} \Delta S_{mwi} \tag{10}$$

$$PET_d = \sum_{i=1}^{n_w} PET_{mdi}, P_d = \sum_{i=1}^{n_w} P_{mdi}, \Delta S_d = \sum_{i=1}^{n_w} \Delta S_{mdi} \tag{11}$$

$$A_w = \frac{PET_w}{P_w - \Delta S_w} A_d = \frac{PET_d}{P_d - \Delta S_d} \tag{12}$$

式中, PET_w 、 P_w 和 ΔS_w 为每年中能量限制季节蒸散发、降雨量和储水量变化, PET_{mw} 、 P_{mw} 和 ΔS_{mw} 为每年中能量限制月份蒸散发、降雨量和储水量变化; PET_d 、 P_d 和 ΔS_d 为每年中水分限制季节蒸散发、降雨量和储水量变化, PET_{md} 、 P_{md} 和 ΔS_{md} 为每年中水分限制月份蒸散发、降雨量和储水量变化; n_w 为季节月数; A_w 为能量限制季节干旱指数, A_d 水分限制季节干旱指数。

2.4 数据分析

运用 EXCEL 2019 和 SPSS 24.0 软件进行统计分析,采用 Mann-Kendall^[35-36] 检验分析研究期内水文和气候变量的趋势变化,图表使用 ArcGIS 10.4.1 与 SigmaPlot 12.5 进行绘制。

3 结果分析

3.1 季节性划分和趋势分析

根据对能量限制和水分限制季节的定义,平江流域 1961—2006 年 1—12 月的多年平均月干旱指数如图 4 所示。其中,1—6 月,月干旱指数小于 1,被定义为能量限制季;7—12 月,月干旱指数大于 1,被定义为水分限制季。这一结果也与图 2 中多年平均月降雨变化相一致,说明本研究季节性划分是可靠的。

通过表 1 分析可知,在森林恢复期,能量限制季降雨量相较于参考期减少了 2.36%,而流域蓄水量和实际蒸散发却增加了 128.77%和 3.13%。另外,流域潜在蒸散发与参考期潜在蒸散发相比基本保持不变。对于水分限制季来说,相较于参考期,森林恢复期降雨量增加了 10.98%,而流域蓄水量和潜在蒸散发却减少了 18.96%和 1.64%,实际蒸散发基本保持不变。

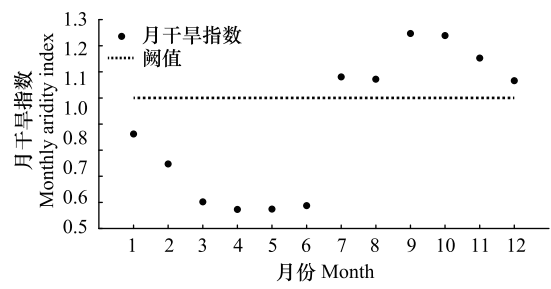


图 4 研究流域月干旱指数

Fig.4 Monthly aridity index in the study watershed

表 1 参考期和森林恢复期气候因子变化分析

Table 1 Analysis of climate variables change between reference and reforestation periods

季节 Season	P_r /mm	P_R /mm	Δ /%	ET_r /mm	ET_R /mm	Δ /%	PET_r /mm	PET_R /mm	Δ /%	ΔS_r	ΔS_R	Δ /%
能量限制季 Energy-limited	1041.17	1016.64	-2.36	467.18	475.60	3.13	634.58	633.44	-0.18	-11.68	3.36	128.77
水分限制季 Water-limited	496.96	551.52	10.98	337.81	339.20	0.41	714.88	703.19	-1.64	-95.20	-113.25	-18.96

P : 降雨 Precipitation; Δ : 变化百分比 Change percentage; ET : 蒸散发 Evapotranspiration; PET : 潜在蒸散发 Potential evapotranspiration; ΔS : 蓄水量变化 Change of water storage; r: 参考期 Reference period; R: 森林恢复期 Reforestation period

如表 2 所示,利用 Mann-Kendall 检验对研究流域的气候和水文变量进行趋势分析,结果表明:1961 至 2006 年,平江流域水分限制季径流量有显著的上升趋势($P<0.05$),而其余的水文和气候变量虽有一定程度的上升或下降趋势,但均未达到统计学显著性。

3.2 Budyko 模型拟合

由表 3 可知,参考期 Budyko 模型拟合精度在能量限制季为 0.94($P<0.01$),水分限制季为 0.69($P<0.01$),精度较高,说明模拟结果较为可靠。同时,从图 5 可以看出,在森林恢复期,能量限制季的数据点基本都位于

参考期所拟合的 Budyko 曲线上方,说明森林恢复对于能量限制季径流具有减少的作用。相反,在水分限制季,数据点基本都位于参考期所拟合的 Budyko 曲线下,说明森林恢复增加了水分限制季径流。

表 2 平江流域 1961—2006 年气候和水文变量趋势分析

Table 2 Trend analysis of climate and hydrological variables in the Pingjiang watershed from 1961 to 2006	
变量 Variables	Mann-Kendall (Z 值)
年降雨量 Annual precipitation	0.86
能量限制季降雨量 Energy-limited season precipitation	-0.06
水分限制季降雨量 Water-limited season precipitation	0.75
年径流量 Annual runoff	1.25
能量限制季径流量 Energy-limited season runoff	-0.24
水分限制季径流量 Energy-limited season runoff	2.18 *
年蒸散发 Annual evapotranspiration	1.19
能量限制季蒸散发 Energy-limited season evapotranspiration	1.34
水分限制季蒸散发 Water-limited season evapotranspiration	0.39

* 表示 $P<0.05$

表 3 参考期 Budyko 模型参数拟合结果

Table 3 Parameter fitting for the Budyko model in the reference period			
季节 Season	参数 Parameter		评价指标 Evaluation index
	n	A	R^2
能量限制季 Energy-limited season	0.78	0.14	0.94
水分限制季 Water-limited season	0.94	0.45×10^{-15}	0.69

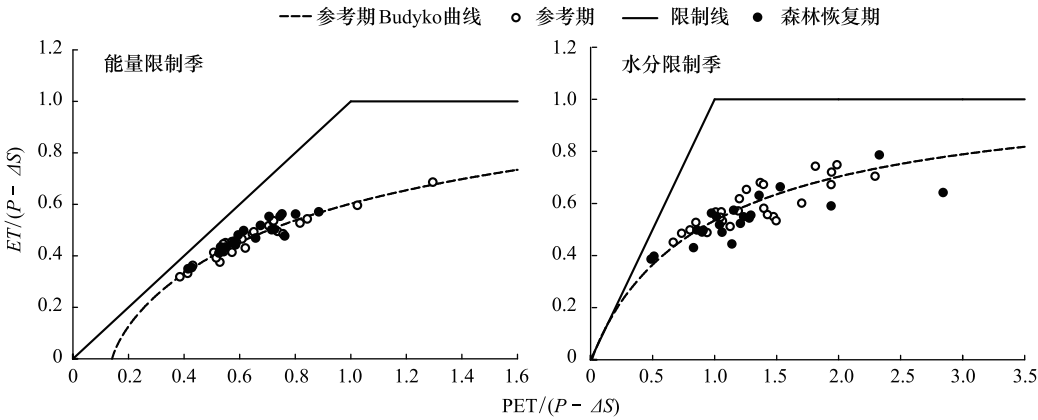


图 5 Budyko 模型拟合下森林恢复对季节性径流的影响

Fig.5 Effects of reforestation on seasonal streamflow under Budyko model fitting

3.3 森林恢复和气候变异对季节性径流的相对贡献

由表 4 可知,森林恢复期(1986—2006)和参考期(1961—1985)相比,森林恢复期能量限制季径流和降雨分别减少了 47.99 mm/a 和 24.53 mm/a,而水分限制季径流和降雨分别增加了 71.21 mm/a 和 54.56 mm/a,能量限制季和水分限制季降雨变化分别占径流变化的 51.11% 和 76.62%,此外,相对贡献结果表明,能量限制季森林恢复和气候变异均导致径流减少,分别减少了 11.71 mm/a 和 36.28 mm/a。与能量限制季相反,在水分限制季森林恢复和气候变异分别使径流增加了 12.27 mm/a 和 58.94 mm/a。说明气候变异是导致季节性径流变化的主要驱动因素。

表 4 森林恢复和气候变异对季节性径流的影响

Table 4 Effects of reforestation and climate variability on seasonal streamflow

时期 Period		$\Delta Q/\text{mm}$	$\Delta P/\text{mm}$	$\Delta Q_{\text{c}}/\text{mm}$	$\Delta Q_{\text{f}}/\text{mm}$	$\Delta Q/\%$	$\Delta Q_{\text{cr}}/\%$	$\Delta Q_{\text{fr}}/\%$
能量限制季 Energy-limited	1986—2006	-47.99	-24.53	-36.28	-11.71	8.22	75.60	24.40
水分限制季 Water-limited	1986—2006	71.21	54.56	58.94	12.27	26.54	82.77	17.23

ΔQ_{f} : 森林变化引起的径流变化量 The runoff variation caused by forest change; ΔQ_{c} : 气候变异引起的径流变化量 The runoff variation caused by climate change; ΔQ : 森林恢复期和参考期径流之差 The difference of runoff between reference and reforestation periods; ΔP : 森林恢复期和参考期降雨之差 The difference of precipitation between reference and reforestation periods; ΔQ_{fr} 和 ΔQ_{cr} : 森林变化和气候变异对径流的贡献 The relative contributions of forest change and climate variability to streamflow

3.4 森林恢复和气候变异对季节性径流的累积影响

森林恢复和气候变异对径流的累积影响如图 6 所示,在森林恢复期的初期(1986—1990 年),森林恢复并没有对能量限制和水分限制季径流产生较大的影响,在此期间,径流变化主要受气候变异控制,而在 1990 年之后,随着森林恢复质量的提高和恢复时间的持续,森林恢复的水文效应逐渐加强,气候变异导致的径流累积效应也在增加。此外,在季节尺度的径流累积变化表明,森林覆盖率的大幅度提高对于季节性径流产生了较大的改变。同时,由图 6 可以看出,季节尺度的累积变化与气候对径流的累积影响的变化趋势一致,进一步表明在长时间的累积影响下,季节性径流变化仍受气候变异主导。

4 讨论

4.1 季节性径流对森林恢复和气候变异的响应

本研究中,相较于参考期,在季节尺度上,森林恢复减少了能量限制季径流,增加了水分限制季径流。目前大多数研究表明,在年尺度上森林恢复对年径流具有负面作用^[5, 14],这与本研究在能量限制季结论一致。然而一些研究认为,年尺度上森林恢复对年径流具有积极的影响效应^[11],这与本研究水分限制季结论相似。例如在我国北方的松花江水系的研究表明:森林覆盖率增加 1%,年径流量也随之增加 1.46 mm^[37]。而 Liu 等^[6]在我国亚热带流域的研究表明,梅江流域森林恢复减少径流量^[6]。然而,Zhou 等^[38]研究了广东省近 50 年的大规模造林对区域水资源的影响,表明森林的增加并没有对区域水资源产生影响。上述研究所得不同结论的原因可能归结于,在年尺度的研究中,忽略了年内气候和植被的季节性变化对径流的影响以及流域所处的地理位置、流域特征、气候条件和植被类型等空间异质性的存在。其次,年尺度的水文效应与季节尺度水文效应变化密切相关。在以降雨为主的流域中,森林恢复会改善土壤水文物理性质^[39]和增加林下植被和枯落物^[40],从而在雨季会增加降雨截留和土壤蓄水,提高地下水补给,进而降低地表径流^[4, 39, 41],而旱季河川径流来源很大程度上依赖于流域地下水和雨季蓄水补给,从而在一定程度上会增加流域旱季径流^[42-45]。因此,森林恢复对季节性径流的年内分布具有积极的影响效应,可以降低极端洪水和干旱发生的概率,同时森林恢复通过对不同季节径流的影响程度进而会对年尺度径流的调节起着至关重要的作用。

此外,气候变异减少了能量限制季径流,增加了水分限制季径流,与森林恢复的水文效应一致。通过表 1 可知,森林恢复期能量限制季有效降雨($P-\Delta S$)的减少和水分限制季有效降雨($P-\Delta S$)的增加可能是气候变异导致季节性径流变化的主要原因。其次,先前研究表明森林覆盖率提高会使蒸散发显著增加,从而对径流产生负面作用^[46-47]。然而本研究中,森林覆盖率的大幅度增加,并没有使流域蒸散发产生显著变化(表 1)。这与 Liu 等^[5]结论一致。原因可能是由于研究流域气候条件较为湿润,流域实际蒸散发和潜在蒸散发强度差异不大,而森林覆盖率的大面积增加会使该区域近地面空间的空气温度显著下降^[48],从而导致该区域的潜在蒸散发下降,进而对于实际蒸散发有抑制作用^[4, 49]。

4.2 森林恢复和气候变异的累积效应

在整个森林恢复期内,森林恢复和气候变异的累积效应对于流域季节性径流产生了显著的改变。但是在

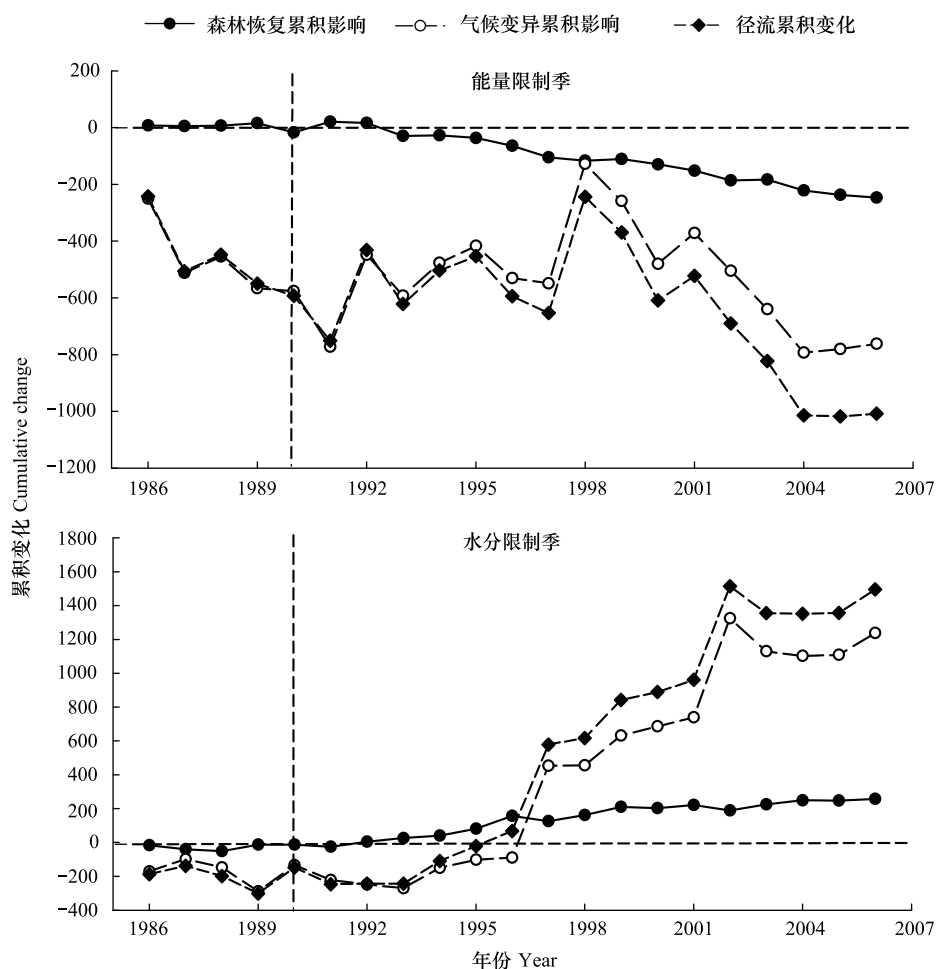


图6 森林恢复和气候变异对季节性径流的累积影响

Fig.6 The cumulative effects of reforestation and climate variability on seasonal streamflow

森林恢复前期(1986—1990),森林覆盖率的增加对于季节性径流的累积效应并没有产生显著影响,这说明,水文效应对于森林恢复的响应存在一个响应时间差^[50]。Stednick^[51]研究也表明:流域发生变化的面积至少达到10%至20%,才会产生显著的水文效应。随着森林恢复的程度增加(1990—2006),森林覆盖率的提高对季节性径流的影响逐渐加强。可能是由于随着恢复年限的增长,森林覆盖率增加超过30%,森林植被的结构和质量有了较大程度的提高。此时,径流变化受森林恢复和气候变异共同作用,但是从图6中可以看出,径流变化依然受气候变异的主导,研究结果与Hou等^[40]在同区域的梅江流域森林恢复和气候变异对旱季径流研究结论一致。然而,目前也存在一些相反的研究结论。如Hou等^[40]研究表明杂谷脑流域旱季径流变化原因主要是由于植被变化所导致。造成不同结论的原因可能是由于流域所处地理位置、气候条件、植被类型等空间异质性的存在,导致季节性径流对森林和气候变异的响应有所差异^[52]。

另外,本研究中,在季节尺度上气候变异和森林恢复对径流的作用是一致的。目前,很多研究都是基于年尺度上来分析森林恢复和气候变异对径流的相对贡献^[5],并且大多数研究表明气候变异和森林恢复对径流的贡献在年尺度存在一个相互抵消的作用^[5,53]。然而,在季节尺度上,气候和森林恢复对季节尺度径流的交互作用既存在增强,也存在相互抵消效应^[40]。这主要取决于气候变异和森林变化的强度和方向^[44,54]。如Hou等^[40]在梅江流域的研究发现,在森林恢复前期,气候变异和森林恢复对旱季径流的影响效应是相互抵消的,然而,在森林恢复后期,气候变异和森林变化的影响效应却是一致的。表明森林对季节性径流的作用会随着时间和森林恢复的程度而发生改变,同时体现了森林恢复的水文累积作用对季节性径流影响的重要性。

5 结论

本研究利用平江流域 1961—2006 年间的水文气象资料和森林覆盖率数据,基于扩展的 Budyko 模型定量分析了森林恢复和气候变异对平江流域季节性径流的影响,得到如下结论:

1) 平江流域森林恢复降低了能量限制季径流 (-11.71 mm/a),增加了水分限制季径流 ($+12.27 \text{ mm/a}$);平江流域气候变异同样降低了能量限制季径流 (-36.28 mm/a),增加了水分限制季的径流 ($+58.94 \text{ mm/a}$),说明森林恢复和气候变异对平江流域季节性径流的影响效应一致,也表明森林恢复对调节年内径流分布具有积极的作用。

2) 森林恢复对径流的累积影响具有一个响应时间差,森林恢复对径流的累积影响在能量限制季和水分限制季具有相互抵消的作用,气候变异与森林恢复的影响效应类似。此外,平江流域季节尺度径流变化主要受气候变异所控制,但森林恢复对季节性径流的作用也不容忽视。

参考文献 (References):

- [1] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, 55(1/4): 3-23.
- [2] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [3] 刘士余, 孙阁, 郭细根. 气候与森林植被变化对水文影响的定量研究进展. *人民长江*, 2012, 43(2): 26-29.
- [4] 刘效东, 刘佩伶, 戴雨航, 莫其锋, 林浩娟, 李吉跃, 张倩媚, 陈修治. 森林与径流关系研究进展. *林业科学*, 2019, 55(7): 155-162.
- [5] Wei X H, Li Q, Zhang M F, Giles-Hansen K, Liu W F, Fan H B, Wang Y, Zhou G Y, Piao S L, Liu S R. Vegetation cover—another dominant factor in determining global water resources in forested regions. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 786-795.
- [6] Liu W F, Wei X H, Liu S R, Liu Y Q, Fan H B, Zhang M F, Yin J M, Zhan M J. How do climate and forest changes affect long-term streamflow dynamics? A case study in the upper reach of Poyang River basin. *Ecohydrology*, 2015, 8(1): 46-57.
- [7] Li Q, Wei X H, Zhang M F, Liu W F, Fan H B, Zhou G Y, Giles-Hansen K, Liu S R, Wang Y. Forest cover change and water yield in large forested watersheds: a global synthetic assessment. *Ecohydrology*, 2017, 10(4): e1838.
- [8] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 71-78.
- [9] 李奇, 朱建华, 冯源, 肖文发. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3): 287-294.
- [10] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 2846.
- [11] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 474-480.
- [12] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 刘世荣, 孙阁. 森林与径流关系——一致性和复杂性. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 761-770.
- [13] Zhang L, Nan Z T, Xu Y, Li S. Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater region of the Heihe River Basin, Northwest China. *PLoS One*, 2016, 11(6): e0158394.
- [14] Li Q, Wei X H, Zhang M F, Liu W F, Giles-Hansen K, Wang Y. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 448-459.
- [15] 段亮亮, 满秀玲, 俞正祥, 刘玉杰, 朱宾宾. 森林干扰对大兴安岭北部森林小流域径流情势的影响. *生态学报*, 2017, 37(5): 1421-1430.
- [16] 朱丽, 秦富仓, 姚云峰, 余新晓. 北京市红门川流域森林植被/土地覆被变化的水文响应. *生态学报*, 2010, 30(16): 4287-4294.
- [17] Wei X H, Liu W F, Zhou P C. Quantifying the relative contributions of forest change and climatic variability to hydrology in large watersheds: a critical review of research methods. *Water*, 2013, 5(2): 728-746.
- [18] Xin Z H, Li Y, Zhang L, Ding W, Ye L, Wu J, Zhang C. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on seasonal streamflow. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 936-945.
- [19] Sun Y, Tian F Q, Yang L, Hu H P. Exploring the spatial variability of contributions from climate variation and change in catchment properties to streamflow decrease in a Mesoscale Basin by three different methods. *Journal of Hydrology*, 2014, 508: 170-180.
- [20] Jiang C, Xiong L H, Wang D B, Liu P, Guo S L, Xu C Y. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 326-338.
- [21] Huang S Z, Chang J X, Huang Q, Chen Y T, Leng G Y. Quantifying the relative contribution of climate and human impacts on runoff change based on the Budyko Hypothesis and SVM model. *Water Resources Management*, 2016, 30(7): 2377-2390.
- [22] 周小珍, 潘兴瑶, 朱永华, 胡亚子. 潮白河流域 1980—2013 年平均水平衡特征研究. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 649-657.
- [23] 胡珊珊, 张涛. 白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 67-71.
- [24] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 齐松, 曹丽萍, 蔡正妹, 陈瑶瑶. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 995-1004.
- [25] 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. *西北林学院学报*, 2012, 27(4): 83-87.
- [26] Liu W F, Wei X H, Li Q, Fan H B, Duan H L, Wu J P, Giles-Hansen K, Zhang H. Hydrological recovery in two large forested watersheds of

- Southeastern China: the importance of watershed properties in determining hydrological responses to reforestation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(12): 4747-4756.
- [27] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, 9(4): 385-403.
- [28] McVicar T R, van Niel T G, Li L T, Hutchinson M F, Mu X M, Liu Z H. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences. *Journal of Hydrology*, 2007, 338(3/4): 196-220.
- [29] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 王盛萍, 郭军庭, 许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. *生态学报*, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [30] Chen X, Alimohammadi N, Wang D B. Modeling interannual variability of seasonal evaporation and storage change based on the extended Budyko framework. *Water Resources Research*, 2013, 49(9): 6067-6078.
- [31] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1985, 1(2): 96-99.
- [32] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [33] Wang D, Wu L. Similarity of climate control on base flow and perennial stream density in the Budyko framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(1): 315-324.
- [34] Yang D W, Sun F B, Liu Z Y, Cong Z T, Ni G H, Lei Z D. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in nonhumid regions of China using the Budyko hypothesis. *Water Resources Research*, 2007, 43(4): W04426.
- [35] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [36] Kendall M G. Rank Correlation Measures. London: Charles Griffin, 1975: 202-202.
- [37] 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林水文效应. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 420-426.
- [38] Zhou G Y, Wei X H, Luo Y, Zhang M F, Li Y L, Qiao Y N, Liu H G, Wang C L. Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong province, China. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): W09503.
- [39] Toohey R C, Boll J, Brooks E S, Jones J R. Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. *Geoderma*, 2018, 315: 138-148.
- [40] Hou Y P, Zhang M F, Meng Z Z, Liu S R, Sun P S, Yang T L. Assessing the impact of forest change and climate variability on dry season runoff by an improved single watershed approach: a comparative study in two large watersheds, China. *Forests*, 2018, 9(1): 46.
- [41] Xu Z P, Liu W F, Wei X H, Fan H B, Ge Y Z, Chen G P, Xu J. Contrasting differences in responses of streamflow regimes between reforestation and fruit tree planting in a subtropical watershed of China. *Forests*, 2019, 10(3): 212.
- [42] 李姝蕾, 鲁程鹏, 李伟, 陈帅, 王冠. 长江螺山站 50 年来基流演变趋势分析. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(5): 128-131.
- [43] 邵跃杰, 罗光明, 王建, 颜伟, 刘景时. 新疆克里雅河上游主要离子化学特征及其成因. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1021-1029.
- [44] Zhang M F, Wei X H, Sun P S, Liu S R. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: the case study in the Upper Minjiang River of Yangtze River basin. *Journal of Hydrology*, 2012, 464-465: 1-11.
- [45] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G, Zhang L, Li R, Yang Q K, Zhang X P, Mu X M, Wen Z M, Liu W Z, Zhao Y A, Liu Z H, Gao P. Developing a decision support tool for China's re-vegetation program: Simulating regional impacts of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1/2): 65-81.
- [46] 崔延华, 宋悦, 栗晓玲. 祁连山区气候变化对黑河出山径流的影响. *人民黄河*, 2017, 39(5): 15-20.
- [47] Li S, Xu M, Sun B. Long-term hydrological response to reforestation in a large watershed in southeastern China. *Hydrological Processes*, 2014, 28(22): 5573-5582.
- [48] Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, Ciais P, Zhou L M, Li L Z X, Myneni R B, Yin Y, Zeng H. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2915-2919.
- [49] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, Zhou P, Liu X D, Xiao Y, Sun G, Scott D F, Zhou S Y D, Han L S, Su Y X. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5918.
- [50] Wei X H, Zhang M F. Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: a single watershed study. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12525.
- [51] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 1996, 176(1/4): 79-95.
- [52] Zhou F, Xu Y P, Chen Y, Xu C Y, Gao Y Q, Du J K. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. *Journal of Hydrology*, 2013, 485: 113-125.
- [53] Shaman J, Stieglitz M, Burns D. Are big basins just the sum of small catchments? *Hydrological Processes*, 2004, 18(16): 3195-3206.
- [54] Guo H, Hu Q, Jiang T. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 2008, 355(1/4): 106-122.