

An Approach for Separating Relative Effects of Vegetation and Climate Changes on Watershed Hydrology

Xuehong Zhao¹, Weifeng Wang^{2*}, Faxing Shen³

¹Inner Mongolia Coal Science Research Institute Co., Ltd., Huhhot Inner Mongolia

²Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Huhhot Inner Mongolia

³Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang Jiangxi

Email: *wang.wf1985@163.com

Received: Jul. 20th, 2015; accepted: Aug. 7th, 2015; published: Aug. 10th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Scientific evaluation of vegetation and climate change impact on the runoff of afforestation or cutting planning, management of river basin water resources, rivers of biodiversity and habitat protection plays an important role. It can help us to understand and evaluate the change of river morphology, sediment migration and the laws of flood and drought. This paper introduces the international on a new assessment method (Tomer-Schilling framework), and analyses the calculation method for the principle. Finally, this paper discusses the feasibility of introducing the method of domestic, so as to provide reference for the development of ecological hydrology in China.

Keywords

Tomer-Schilling Framework, Vegetation Changes, Climate Changes, Watershed Hydrology, Feasibility

一种评估植被与气候变化对河川径流影响的方法

赵学宏¹, 王伟峰^{2*}, 沈发兴³

¹内蒙古煤炭科学研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特

³江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌

*通讯作者。

Email: *wang.wf1985@163.com

收稿日期: 2015年7月20日; 录用日期: 2015年8月7日; 发布日期: 2015年8月10日

摘要

科学评估植被与气候变化对河川径流的影响对造林或采伐规划、流域水资源管理、河流生物多样性及生境保护具有重要作用。它可以帮助我们理解与评估河流形态的变化、泥沙的迁移及水灾与旱灾的规律。文章介绍了国际上一种新的评估方法(Tomer-Schilling framework), 并分析了其计算方法原理。最后, 探讨了将该方法引入国内的可行性, 以期为我国生态水文学的发展提供参考。

关键词

Tomer-Schilling Framework, 植被变化, 气候变化, 河川径流, 可行性

1. 引言

区分植被与气候变化对流域径流量的相对影响, 对深入认识流域水资源形成和演变规律、合理开发利用水资源和保护生态环境具有重要的科学价值。影响流域水文变化的因素众多, 主要有植被类型、土壤性质、地质、地形、气候、河道水库构筑与废弃、土地利用方式以及上述因素相互作用的空间构成等[1]。目前一致认为, 土地利用变化(land use and land cover change, LUCC, 主要指的是植被变化)与气候变化是众多因素中引起流域水文变化最为关键的两个驱动点[2]。但是, 如何评估它们对流域水文循环的相对影响, 一直是困扰世界各国生态水文研究者的一个难题, 解决此难题对应对全球气候变化有重要指导意义[3]。

目前, 在中国大范围地实行森林恢复工程, 但森林恢复有可能引起水资源的减少。如何区别气候以及植被变化对中国各大流域水文的影响, 变得极为重要[4]。然而, 相关工作在中国的开展较少。国际上传统的应用配对流域实验来研究森林变化对水文的影响, 被概括为“配对流域法是唯一可以标识出植被覆盖变化、流域内各种人类行为、气候变化等各个因素对水文影响的方法”[5], 遗憾的是目前国内建立起来的真正意义上的配对集水区设计与分析很少[6], 因此, 需要探索其他的方法来研究森林变化对水资源的影响。本文着重介绍一种在国外得到广泛应用, 可以半定量描述植被与气候变化对河川径流影响的简便方法(Tomer-Schilling framework), 并科学分析了其在国内流域应用的可行性。

2. Tomer-Schilling Framework 方法

Tomer-Schilling framework 是由美国学者 Mark D. Tomer 和 Keith E. Schilling 提出的一种处理分析流域水文平衡关系中影响因素的统计学方法, 主要是通过利用流域内水 - 热收支的耦合关系呈现一种概念性模型, 界定为生态水文分析法, 以用于鉴定流域内植被与气候变化对流域水循环的影响。1999年, Karlen, D.L.等人[7]在美国爱荷华州(Lowa)西部农耕区小流域进行观察, 对这种方法进行了初步尝试; 2009年, Mark D. Tomer 与 Keith E. Schilling [1]在美国中西部农业专业化地区密西西比河支流的4个流域应用了该概念模型分析, 该研究成功的将气候变化与植被变化区分开来。至此, 该框架模型从小流域的研究中蜕变出来, 得到了发展; 2012年, Jorge L. Peña-Arancibia 等人[8]在澳大利亚2个超大型流域中也应用了该方法, 与其他方法结果类似, 在一定程度上验证了该模型的有效性和简便性, 标志着该方法的成熟。

2.1. 计算方法原理

研究降水与能量收支耦合,为客观描述水-热收支之间的关系,引用一个“生态水文”(ecohydrologic)术语来表征。探讨“生态水文”,必须先基于一个最基本的水文收支平衡公式,该公式可以表述为:

$$PPT = ET + Q + D + \Delta S \quad (1)$$

该公式中, PPT 为流域内的降水(precipitation)总量, ET 为流域内的蒸发散(evapotranspiration), Q 为流域内的径流量(stream discharge, Q 等于地表径流 surface runoff 与基流 baseflow 之和), D 为流域内的深层地下水损耗(deep groundwater losses), ΔS 为流域内的土壤水分贮存量;即流域内的降水量等于蒸发散、径流量、深层地下水损耗、土壤水分贮存量之和。

一般而言,径流量 Q 可由流域内的水文站检测。对于水文站应当选择在流域内最靠近出水口的位置,以便检测出流域的径流总量。降水量 PPT 可以由流域内的气象站观察记录。对于某流域降水量的气候变化分析中,气象站的选择关系很大,单站降水量无法代表整个流域内的降水量,而因采用面雨量的统计值进行分析,从而可以参照荷兰气象学家 A.N.Thiessen 提出的泰森多边形分析法(Thiessen Polygon method)。对于 D, 则应该通过实地勘察或文献查阅等途径,了解其地质构造情况。对垂直渗透率较小的流域,例如:地下有深厚的冰土隔水层, D 值可以忽略不计;但对于具有特殊地质构造的地区,例如:喀斯特地貌地区,其垂直渗透率可能较大,则应该着重予以测定,依据实际情况减去这部分值。

该方法特别重视 ΔS 取值情况,按照传统的方法,流域内土壤贮水量的大小一般被假定为固定不变的,但是近年来这种假定遭到了质疑。根据 Mark D. Tomer 与 Keith E. Schilling 在美国中西部密西西比河支流的研究表明,流域水文数据的多年平均值显示,流域内观察年限越长, ΔS 趋于最小化的程度越高,即因忽略而引起的误差越小。他们发现通过一种简单的分段方法,就可以使得这种误差达到最小,即集合从开始到结束都是干旱年份的时间段,将观测数据以此为依据,分为 n 段处理。在各个时间段里的土壤贮水量的变化最小,这主要是前一年干旱,将会影响到下一年的 Q,而正常降水的年份里,该值变化的确很小,可以忽略。例如:先确定一个水文年的起止点(国外一般使用的是前一年的 10 月 1 日到下一年的 9 月 30 日为一个水文年),假如 1954 年为异常干旱年,1977 年为干旱年,那么以这两年为分界点,这个时间段为 1954~1977 年,通过这种方法忽略 ΔS ,由此产生的数据更为符合事实。由此,消除了 D 与 ΔS ,那么 ET 就等于 PPT 减去 Q,从而避免了过高的估计 ET 值。

对于该方法的另外一个参数值,流域的潜在蒸发散(PET: potential evapotranspiration)的估计,也有众多的方法。当有齐全的大气温度(air temperature)、太阳辐射(solar radiation)、相对湿度(relative humidity)、风速(wind speed)、空气动力阻力(aerodynamic resistance)、基本阻力(basic canopy resistance)等数据时,可用 penman-derived method。而在此,一般可以采用较为简便的哈格里夫斯方法(The Hargreaves method) [9]:

$$PET = 0.0023R_a \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} + 17.8 \right) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad (2)$$

其中, R_a 为太阳辐射值(extraterrestrial radiation) ($\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{t}^{-1}$), T_{\max} 与 T_{\min} 分别代表最高温度值和最低温度值($^{\circ}\text{C}$),其时间尺度可以是日温度值亦可为月温度值。

当有了 PPT、Q、ET 等数据,则为所研究流域内的生态系统对水、热利用率的高低提供了一种可能性。一般认为,实际蒸发散(ET)的高低主要与可用的降水和能量的分布范围及分布时段有着直接密切的关系,同时也受当地植被类型和覆盖率的影响。生态系统总有将能量与物质的利用率达到最高的趋势,也就是最小化的剩余水(PPT-ET)以及最小化的剩余能量(PET-ET),因此,这些未被利用的水与总水量,未被利用的能量与总能量之间的比值可以控制在 0~1 之间,即为:

$$P_{ex} = (PPT - ET) / PPT \quad (3)$$

$$E_{ex} = (PET - ET) / PET \quad (4)$$

P_{ex} 与 E_{ex} 表示可用的水与能量没被利用的比率(ex 为 in excess), 就是剩余的、超过了系统需求的部分所占总供应量的比例。而在流域生态系统里, 剩余的水就是可视的、可观察到的河流径流总量 Q , 因此公式(3)就可简化为以下形式:

$$P_{ex} = Q / PPT \quad (5)$$

为了鉴别植被变化与气候变化对流域水文的影响, 可以用概念框架图表示(见图 1 所示)。生态水文变化与气候和植被变化密切相关, 植被变化直接影响到 ET , 但是对 PPT 和 PET 没有显著影响。此时, 依赖于 ET 变化, 剩余水或者能量将同时增加或者减少, 从而导致生态水文的变化。另一方面, PPT/PET 比率的变化, 则需要剩余水增加、剩余能量减少, 反之亦然。

当分段的趋势出现在坐标的第一、三象限时, 表示植被变化是引起水文变化的主要原因。其中, 在第一象限表示该流域在这段时期内毁林开荒, 破坏植被或者森林采伐等, 使植被覆盖率降低, 从而导致了剩余能量和剩余水的增多, 与配对流域法所得出的一般性结论“森林多水少, 森林少水多”相同。对第三象限, 反之。当水文趋势发生在第二、四象限则表示气候为水文变化的主要因素。

2.2. 流域选择的考虑

1) 流域内居民点的面积, 所占比重不能过大, 不能存在大规模的居民点。2) 着重考虑流域内的地质地貌情况, 了解其内部结构, 例如: 是否存在喀斯特地貌、流域内的主要土壤类型及其特征, 这些因素对流域的渗透系数、地下水活动等产生巨大的影响。

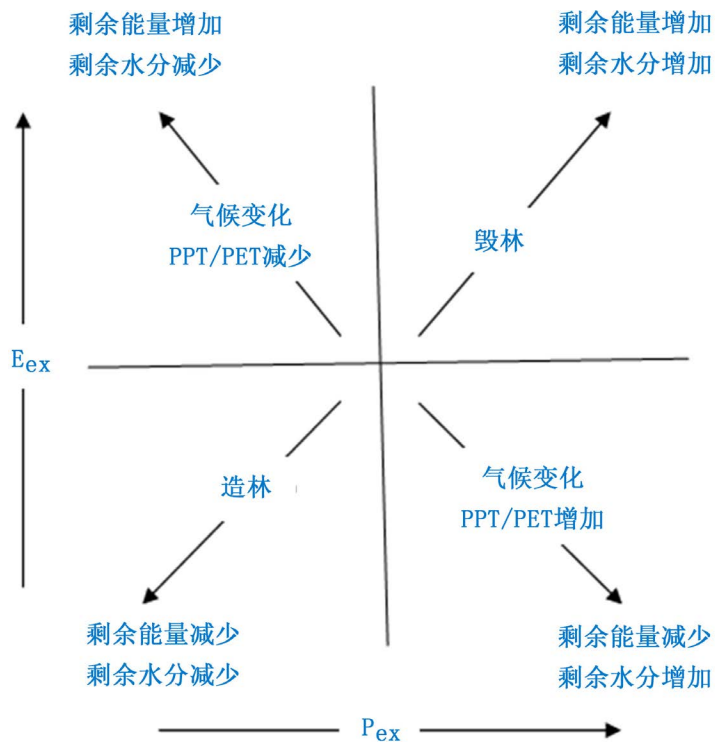


Figure 1. The concept framework of vegetation and climate changes effect on watershed hydrology

图 1. 植被与气候变化对流域水文影响的概念框架

2.3. 该方法的优缺点

优点：不需要配对流域作为参考，减低了水文分析数据来源的难度；方法简便易用，且可以很好的判别出气候与植被变化对流域水文变化的影响。

缺点：不能够定量的区别出每个因素具体的影响量，只是一个半定量的方法。

2.4. Tomer-Schilling Framework 方法适用的必要条件

Tomer 等提出的概念性生态水文模型中未考虑冰雪融水对径流的补给，不适用于冰川补给占径流比例较大的流域。模型中认为实际蒸发量由其占降水量和潜在蒸发量的相对比例和时段决定，同时受土地利用状况、植被覆盖类型和农业管理方式等导致下垫面条件改变的因素的影响。在小流域内的降水量和潜在蒸散发量不会因下垫面条件的改变而改变，而在大流域内两者虽然会随下垫面条件的改变有一定的改变，但因为是受到间接的影响而改变程度较弱。

3. Tomer-Schilling Framework 方法在国内生态水文研究中的可行性分析

中国幅员辽阔，植被、气候与地形地貌的组合关系多且复杂多样。从东至西，高原、山地、盆地、平原，地貌类型齐全；从南到北，热带雨林、季雨林、亚热带常绿阔叶林、温带针阔叶混交林、寒温带针叶林，气候植被带配套完整。然而，探讨植被、气候与水文关系的分析方法众多，限制了研究结果的实用性；水资源总体严重缺乏与经济人口的迅速增长之间的供需矛盾日趋激烈，促使植被 - 气候 - 水文的三角关系的研究在中国具有极为独特的战略意义。Tomer-Schilling framework 近年来在流域水文分析领域得到了快速的发展，并取得了一些初步的研究成果。下面以江西省鄱阳湖流域为例，探讨其应用前景。

鄱阳湖南北 173 km，湖体面积 3583 km²，是长江水系的调节器，具有巨大的调蓄洪水、降解污染、调节气候等的生态功能。同时，也是中国最大的淡水湖，是世界上最大的白鹤越冬栖息地。鄱阳湖流域总面积约为 160,000 km²，由赣江、抚河、信江、修河、饶河等五大水系构成，占江西省国土面积的 97%，可以说，整个江西省就是构成了一个大流域。由于历史上对森林的破坏及工农业的发展和城市化的推进，后自上世纪 80 年代前后，又逐渐恢复至目前 63.1% 的森林覆盖率，在此过程中积累了大量的植被变化与水文数据，森林干扰与水文关系势必显著，但目前数理统计关系的建立几乎为零。因此，现存在的大量数据，为研究流域间的水 - 热耦合关系提供了重要的保障。目前，江西的发展面对生态保护与经济发展的双重压力，全省实施了基于生态保护与恢复的“山江湖工程”。经过近 20 多年的治理与保护，流域的生态问题得到明显缓解，然而鄱阳湖流域的生态问题仍十分严峻。作为林业大省，鄱阳湖流域的水土保持与恢复工程，对水文状况会产生重要的影响。因此，研究整个流域中的森林、气候与水的关系，对鄱阳湖流域的保护乃至长江中下游生态安全和社会经济发展都有十分重要的战略意义。

在研究鄱阳湖流域植被、气候与水文关系方面，Tomer-Schilling framework 是一种值得认可的方法，该方法有简洁的优点，可以为植被恢复、生态安全、水资源供给提供更科学有效和精确的依据。建议在该方法的应用过程中，着重加强土壤水分贮存研究，最大限度消除 ΔS 对流域水文研究产生的不利影响。同时，探讨是否可以定量的区分出植被与气候变化对水文的影响，如果能够做到量化，那便极大程度上弥补该方法的不足，促进该概念性框架方法的发展。

基金项目

内蒙古自然科学基金博士基金项目(2015BS0323)。

参考文献 (References)

- [1] Tomer, M.D. and Schilling, K.E. (2009) A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on wa-

- tershed hydrology. *Journal of Hydrology*, **376**, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.029>
- [2] Wei, X.H. and Zhang, M.F. (2010) Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study. *Water Resources Research*, **12**. <http://dx.doi.org/10.1029/2010WR009250>
- [3] Zhao, F.F., Zhang, L., Xu, Z.X., et al. (2010) Evaluation of methods for estimating the effects of vegetation change and climate variability on Streamflow. *Water Resources Research*, **3**. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR007702>
- [4] Zhou, G.Y., Wei, X.H., Luo, Y., et al. (2010) Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong Province, China. *Water Resources Research*, **46**, W09503.
- [5] Andréassian, V. (2004) Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, **291**, 1-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- [6] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 等. (2005) 森林与径流关系:一致性和复杂性. *自然资源学报*, **5**, 761-770.
- [7] Karlen, D.L., Kramer, L.A., James, D.E., et al. (1999) Field-scale watershed evaluations on deep-loess soils: Topography and agronomic practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, **4**, 693-704.
- [8] Peña-Arancibia, J.L., van Dijk, A.I.J.M., Guerschman, J.P., Mulligan, M., Bruijnzeel, L.A. (Sampurno) and McVicar, T.R. (2012) Detecting changes in streamflow after partial woodland clearing in two large catchments in the seasonal tropics. *Journal of Hydrology*, **416-417**, 60-71.
- [9] Hargreaves, L.G., Hargreaves, G.H., Riley, J.P., et al. (1985) Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **3**, 265-275. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:3\(265\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:3(265))