

森林火灾对流域水循环影响的研究进展

周艳春¹, 许士国¹, 张永强²

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;
2. CSIRO Land and Water, GPO BOX 1666, Canberra ACT 2601, Australia)

摘要: 全球气候变暖导致森林火险天气增加, 森林火灾的发生机率有上升的趋势, 因此, 森林流域的防灾减灾与灾后重建问题的研究值得重视。森林火灾通过影响植被、地表枯落物、土壤及生态环境等影响流域水文过程的各个环节, 森林火灾的水文效应受到国内外学者的广泛关注。文章从森林火灾对降水截留、土壤水文特性、流域蒸散发和径流量等方面分析了森林火灾对流域水循环影响的国内外研究进展。同时指出, 由于森林火灾的空间异质性导致火烧对流域水循环各分量的影响程度不同, 未来分析森林火灾对流域水文过程的影响时应考虑植被类型、火的类型及火烧的严重程度等因素。

关键词: 森林火灾; 降雨截留; 土壤下渗; 土壤蓄水能力; 蒸散发; 径流

中图分类号: P33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0116-05

Effects of Forest Fire on the Watershed Hydrological Cycle

ZHOU Yan chun¹, XU Shi guo¹, ZHANG Yong qiang²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. CSIRO Land and Water, GPO BOX 1666, Canberra ACT 2601, Australia)

Abstract: Global warming results in the increasing in the forest fire danger weather and forest fire frequency. Therefore, it is important to study the disaster control and reduction and post disaster reconstruction in the forest watershed. The watershed hydrology process can be affected by the forest fire through destroying vegetation cover and litter on the ground, altering soil properties, and deteriorating ecological environment, and thus the research of hydrological response of forest fire has received wide spread attentions. This paper reviewed the impacts of forest fire on the hydrological processes in aspect of rainfall interception, soil hydrology, evapotranspiration, and water yield. Due to different impact degrees of each hydrological factor to forest fire caused by the spatial heterogeneity of forest fire, the vegetation type, fire type, and fire severity need to be taken into account in the analysis of the impacts of forest fire on the hydrological processes in future.

Key words: forest fire; rainfall interception; soil infiltration; soil water storage capacity; evapotranspiration; runoff

林火作为森林生态系统的生态因子, 经常作用于森林生态系统^[1]。林火失去人为控制, 在林地内自由蔓延和扩展时便形成森林火灾。森林火灾破坏生态环境, 加剧水土流失, 影响流域的水文过程。随着全球气候变暖, 特别是20世纪80年代以来, 世界范围内森林火灾的发生有增加的趋势^[2,3]。近年来美国、澳大利亚、欧洲、中国等地森林大火不断^[4,5], 森林火灾引起世界各国的高度重视, 对森林火灾及其影响的研究也不断涌现, 其中森林火灾的水文效应就是一个方面。森林火灾通过对植被及林下土壤的破坏而影响流域水文过程的各个环节, 影响流域水资源的时空分布, 进而影

响经济社会的可持续发展。然而, 我国由于森林水文研究历史较短, 灾后缺乏长期连续观测数据, 研究方向多集中于火灾后的短期径流响应, 对森林火灾引起水文过程变化的机制欠缺讨论。本文通过重点分析森林火灾对降水分配、土壤水文特性、地表蒸散发及径流的影响, 展现森林火灾对流域水循环的影响, 并探讨了森林火灾对流域水循环影响研究的发展趋势。

1 森林火灾对降水分配的影响

森林通过林冠层和凋落物层对降水进行再分配。首先

收稿日期: 2013-04-19 修回日期: 2013-08-07 网络出版时间: 2013-08-23
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1502.011.htm>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51279022)
作者简介: 周艳春(1984), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 主要从事森林火灾对流域水文影响研究。E-mail: ychzhou@mail.dlut.edu.cn

是林冠层对降水进行截留,数值上等于降水量减去穿透雨与树干径流量之和^[6];其次是林区凋落物层进行二次分配^[7]。凋落物层结构松散,有较大的水分截持能力。经过林冠截留的降水到达地表后,部分被凋落物层截留,部分下渗到土壤中,超渗水量形成地表径流。

林冠层对降水的截留一般用林冠截留率表示。林冠截留率随降雨量的增加而减小,随森林郁闭度和林分密度的增加而增加,并呈现一定的区域性差异^[8-9],主要受降水特征、森林类型、林分特征及风速等因素影响^[10]。研究表明,林冠截留率一般在9.0%~69.1%左右,在相似茂密的森林覆盖度下,林冠截留率一般规律是:针叶林>阔叶林,落叶林>常绿林,复层异龄林>单层林^[11-12]。林冠截留后,凋落物层对降雨进行第二次调蓄分配。凋落物层不但截留降雨,而且削弱降雨动能,缓冲雨滴对地面的直接冲击,减少水土流失,在森林植被截留效应中具有重要作用。凋落物的截留蓄水能力取决于凋落物的蓄积量和持水能力等^[13],与凋落物的成分、厚度、分解程度、湿度和林外降雨特征等有密切关系^[11]。目前,对林冠截留的研究较为广泛,以Rutter^[14-15]和Gash^[16]林冠截留模型为代表,已经能够较好地预测林冠截留效应,从定位的实验观测发展到模型模拟阶段,深入探讨林冠截留的过程和机理。而凋落物层位于林冠层下方,野外测量凋落物层截留量较为困难,多为样品选定后实验室测定并推算得到^[11],存在尺度转换的问题。

森林火灾烧毁植物冠层,破坏地表的枯枝落叶层,导致森林生态系统的截留作用锐减或者消失。由于森林火灾的空间异质性,对林冠层和凋落物层的破坏程度不均匀,导致截留量的测定较为困难。目前这方面的研究较少,大多集中于定性分析,定量可供参考的实例不多。可以尝试实验室内不同火强及火烧类型的林火模拟,测定不同火烧严重程度时林冠层及枯枝落叶层的截留变化。

2 森林火灾对土壤水文特性的影响

森林土壤物理结构好,孔隙度高,具有较强的透水性和持水能力。森林火灾烧毁地表植被的同时,破坏凋落物层和腐殖质层,影响土壤的理化性质,从而影响到土壤的渗透性和土壤的持水能力。

2.1 森林火灾对土壤渗透性的影响

林下土壤良好的渗透性是森林水文的一个重要特征,其关系到地表径流的产生、地下水的补给及土壤侵蚀等。由于凋落物层、树根及林下特殊生物群的影响,森林生态系统的土壤表层富含丰富的有机质和腐殖质,形成良好的土壤团聚结构和孔隙状况,有利于水分下渗;随土层的加深,根系密度降低,土壤有机质的含量逐渐减少,土壤孔隙度降低,土壤容重逐渐增加,土壤的入渗性能降低。一般而言,经过森林火灾的高强度火烧后,凋落物层被烧毁,有机质含量明显降低,如Fernandez等^[17]对比了未发生火灾和高强度森林火灾发生后地表0~5 cm和5~10 cm厚度土样中有机碳的含量,发现高强度火灾导致土壤表层0~10 cm有机碳损失量达50%左右。也有研究表明,火灾后土壤表层的有机质含量增加^[18],但这是林冠层中燃烧不充分的枝叶落到土壤表面导

致的^[19]。有机质是形成土壤团粒结构的重要物质,火灾后土壤表层有机质含量减少,致使土壤中团聚体的稳定性降低^[20];在后期雨滴的溅蚀及击打作用下团聚体解体,分散的颗粒在雨水的冲刷作用下填充了土壤表面的孔隙并在土壤表面形成“结皮”,导致土壤通透性变差^[21]。据美国伊利诺斯州栎林沙壤土地地进行的调查,火烧后水分渗透量仅为未烧前的1/3^[21]。刘效雨等^[23]对比了火灾前后毛竹林地土壤的渗透速率,发现火灾后的土壤渗透率和前30 min的平均速率分别为火灾前的26.01%和34.54%。

另外,土壤的斥水性也是影响土壤渗透性的一个重要因素。土壤中的有机质分解后形成斥水有机物,这些有机物在土壤颗粒表面形成类似蜡质的斥水层,使得土壤颗粒和水分子之间产生相斥作用,导致土壤水分下渗性能减弱^[24]。土壤的斥水性的变化主要受土壤含水量、土壤质地和斥水性有机物含量等因素的影响,其中土壤含水量与土壤斥水性呈现一定的负相关关系,即土壤含水量越小,土壤斥水性越大^[25]。森林火灾通过土壤的热传导作用使得土壤水分蒸发变干,土壤斥水性增加。另外,森林火灾通过控制土壤温度的变化及峰值温度的持续时间来影响土壤的斥水性。土壤温度变化在一定范围内时,受火烧影响土壤的斥水性增强^[26],超过该范围的持续高温条件使得土壤表层的部分斥水性有机物挥发或者分解,挥发的斥水性有机物部分进入深层土壤遇冷凝结于土壤颗粒表层,使得深层土壤的斥水性加大。Debano^[27]发现火烧后土壤温度达到175℃~200℃时,土壤的斥水性增强,当土壤温度高于270℃~300℃时,土壤的斥水性被破坏^[28-29]。斥水性的破坏温度受当时火烧环境的影响,厌氧环境的破坏温度要高于富氧时的破坏温度^[30]。虽然温度达到一定范围时土壤的斥水性被破坏,但受火灾影响后土壤容重增加、平均孔隙度减少土壤的结构也已经改变^[31],总体上土壤的渗透性能降低。

2.2 森林火灾对土壤蓄水量的影响

土壤厚度一定时,土壤容重越小,孔隙度越大,土壤的蓄水量就越大^[10-32]。森林土壤的蓄水能力主要由土壤中的非毛管孔隙度决定^[33]。林地表层的枯枝落叶层及土壤系统中错综复杂的根系致使森林土壤结构松散,具有较好的孔隙分布,为土壤水的传输和贮存提供了有利条件。森林火灾破坏了枯枝落叶层和腐殖质层,严重影响土壤表层的蓄水量,使土壤蓄水能力下降。胡海清等^[31]比较研究了大兴安岭松岭林区白桦林、落叶松林及白桦落叶松混交林火烧迹地和未烧样地的土壤水分物理性质,发现火灾后土壤容重增加,土壤平均孔隙度以及土壤持水量减小。

3 森林火灾对地表蒸散发的影响

对没有人类活动干扰的流域而言,蒸散发是流域水分损失的主要组成部分。森林流域的蒸散发主要包括截留蒸发、植被蒸腾和土壤蒸发。一般而言,植被覆盖良好的流域蒸散发以截留蒸发和植被蒸腾为主,土壤蒸发次之^[34]。而森林火灾烧毁大量植被,直接导致截留蒸发和植被蒸腾作用的锐减或消失^[35-36],使森林流域蒸散发由植被蒸腾为主转变为土壤蒸发为主。火灾后,随着植被的生长与恢复,流域蒸散发

逐渐恢复至火灾前水平,但这是一个长期的过程:一方面,火烧环境促进了部分植物种子(如球果类种子)的释放;另一方面,火灾导致林分密度降低,改善了林内的光照条件,而且火烧迹地营养物质丰富,有利于植物种子的萌发和生长。幼苗期植被生长旺盛,逐渐出现对阳光及养分的争夺,植被间出现优胜劣汰,并逐渐形成新的森林生态系统^[37]。这个过程中,植被的生长需要消耗大量的水分,此时流域的蒸散发逐渐增大,新的森林生态系统形成后,森林树种逐渐成熟,林下植被也基本发育完全,蒸散发量逐渐减小,直至达到新的平衡。

森林流域蒸散发的变化跟火烧的严重程度和当地的气候条件等密切相关。火烧越严重,植被受损面积越大,流域蒸散发的变化越剧烈。气候条件也是影响流域蒸散发变化重要因素。气候湿润地区的供水条件充足,流域蒸散发量主要由蒸散发能力决定,植被生长期不一定引起实际蒸散发量的明显变化。而在干旱地区,流域蒸散发主要由地面供水(地表水分条件)决定流域蒸散发量,植被生长导致蒸腾量的增加,表现为蒸散发量的增大^[38]。

4 森林火灾对径流的影响

森林火灾通过影响流域的蒸散发而影响流域的径流量。研究表明,成熟林的产水量要多于生长期森林的产水量^[36,39]。森林火灾对流域产水量的影响取决于森林生态系统中植被对火灾的响应情况,不同的响应状态导致流域产水量的不同。森林火灾主要通过以下几个方面影响流域的产水量^[40-41]。

(1) 火灾对森林的干扰程度。主要指森林流域受火灾影响的范围和火的强度。当森林流域受火灾影响范围小于 20% 时,森林火灾对流域的径流量影响不明显^[42]。

(2) 植被对火灾的生态响应。主要指林冠层的恢复是由种子再生还是由未被烧死的树木恢复。与受损林木恢复相比,植被由种子萌发生长恢复是一个长期的过程,对流域产水量的影响较大。

(3) 距离火灾发生的时间。火灾发生后,植被通过再生或者恢复逐渐形成新的森林生态系统,距离火灾发生时间的长短影响树龄、新生林的密度及新生林的生长态势,这些因素反映了新生林的耗水情况。

(4) 森林自然稀疏及衰老的速率。随着植被的逐渐恢复,林木间优胜劣汰,逐渐达到新的生态系统平衡。林木自然稀疏和衰老的速率影响流域产水量恢复火灾前水平的速度。

不同森林树种对火灾的生态响应不同,导致对径流的影响也不同。以桉树为例,根据桉树对火的响应,简单的将其分为耐火型和不耐火型。耐火型桉树皮厚,一般强度的火不能致死,被火烧毁的冠层可由皮下嫩芽恢复或者由根茎再生。耐火型桉树受火灾影响程度较小,致死率低,火灾后植被的恢复较快,流域径流量的变化较小。而不耐火型桉树皮薄,很容易被火烧死,火灾后这类桉树主要由种子再生,林龄较为一致,因此也成为多数学者的研究对象^[43]。

森林火灾对径流的影响将伴随植被的恢复阶段,因此是一个长期的过程。当火灾强度较大、桉树林由种子萌发恢复时,森林火灾的水文响应过程可以分为三个阶段^[44]。

(1) 火灾后短期(2~5 年)径流增加阶段。火灾烧毁林上冠层及地表枯落物层,导致截留及蒸散发的减少,加上火烧改变了土壤的理化性质,最终使得流域产水量的增加。

(2) 火灾后 20~40 年间,随着植被的逐渐恢复,流域产水量逐渐减少至最小值。火灾中落入土壤的种子在充足的光照和养分条件下生长发育,植被间争夺养分迅速生长,冠层截留和植被蒸腾作用逐渐增加,此时植被耗水量逐渐达到峰值。

(3) 径流增加并逐渐恢复至火灾前的相对平衡阶段。这个阶段林冠层已基本发育完全并开始衰老,经过植被的自然稀疏森林内部的层次结构已形成,流域蒸散发量逐渐减小至火灾前平衡状态,在平均降水条件下流域的径流出现增加并达到新的平衡。

目前,森林火灾水文效应的研究主要集中在火灾后短期内径流量的增加方面。Helvey 等^[45]通过比较美国华盛顿三个流域火灾前后的年径流量,发现火灾后的 7 年间径流深由火灾前的 10.7 cm 增加到 47.2 cm; Scott 等^[46]研究表明南非的 2 个流域由于火灾的影响总径流量增加了 12%,而在火灾后的第一年和第二年径流量分别增加了 62% 和 20%; Lane 等^[47]研究了 2003 年澳大利亚维多利亚州两个山区流域的森林大火,发现火灾后两年内径流量明显增加,并认为火灾后 5 年径流量出现减小并恢复到火灾前的水平。相反,也有研究表明火灾对径流的影响不大,如 Tan 等^[48]表明澳大利亚维多利亚州 2009 年黑色星期六的森林火灾对流域径流的影响,发现火灾对径流量没有明显影响,但是火灾后的 6~7 年间测得桉树的蒸散发有明显增加^[49]。

在森林火灾的长期水文效应研究方面两个里程碑式的研究为 Langford^[50]和 Kuczera^[40]发现火灾后植被恢复阶段径流明显减少。两人均以 1939 年澳大利亚的森林大火为例,发现桉树林的恢复阶段流域的产水量明显减少。并且 Kuczera 提出桉树龄与流域产水量的关系(Kuczera 曲线),指出流域中再生桉树 25~30 年时流域产水量将减少 50% 左右,之后流域产水量逐渐增加恢复至火灾前水平,这个时间要 100 年以上。随后 Watson^[44]完善了 Kuczera 的研究,并指出火灾后早期径流量的增加现象,然后减少至最小值,再逐渐恢复至火灾前的径流水平。

以 1987 年大兴安岭森林大火为例,蔡体久等^[51]采用单独流域实验法研究了森林火灾对河川径流的影响,发现灾后天径流量明显增加,火烧导致森林对降水的调控能力减弱。舒立福等^[52]总结了火干扰对森林水文的影响,指出火对流域水文的影响取决于火的强度和频度。

总体而言,森林火灾对流域水文过程的影响与森林类型,火烧的严重程度及降水特征等密切相关。森林火灾扰乱森林生态系统的稳定性,破坏生态环境,影响流域的水循环过程。森林火灾水文响应的研究对灾后植被恢复和流域水资源的规划利用有重要的指导意义。

5 结语

森林是陆地生态系统的水分调节器,森林植被变化影响流域水量平衡的各个环节。森林火灾烧毁林冠层和地表凋落物层,致使森林生态系统对降水的再分配作用锐减或者

消失;破坏森林土壤良好的物理结构,导致林下土壤的渗透性能和蓄水能力降低,进而加剧水土流失。火灾破坏地表植被的同时,流域的蒸散发损失由截留蒸发和植被蒸腾转变为土壤蒸发。火灾后短期内流域水分损失的减少直接表现为流域产水量的增加,伴随植被的恢复,植被蒸腾耗水致使流域产水量的减少,随后逐渐恢复至火灾前的相对平衡状态。

森林火灾是导致植被变化的一种特殊方式,对流域水文过程的影响是一个长期复杂的过程。尽管我国在森林生态系统影响水量平衡的各分量研究上已经取得了一定的成果,但是对于森林生态系统综合性的定位研究较少。随着高科技的进一步发展,对森林水文的长期定位综合研究是森林水文的发展趋势。长期定位观测是取得第一手观测资料的基础,在观测数据的基础上,分析探讨森林生态系统的发展规律及其对流域水文过程的影响。此外,森林火灾的空间异质性导致火烧对流域水循环各分量的影响程度不同,在分析森林火灾对流域水文过程的影响时应考虑植被类型、火的类型及火烧的严重程度等因素,尝试将火、森林植被与水文过程的相互作用耦合到水文模型中,推动森林水文领域的更快更好发展。

参考文献(References):

- [1] 郑焕能,胡海清.火在森林生态系统平衡中的影响[J].东北林业大学学报,1990,18(1):8-13. (ZHENG Huaneng, HU Haiqing. Influence of Fire on the Balance of Forest Ecosystem [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1990, 18(1): 8-13. (in Chinese))
- [2] Westerling A L, Hidalgo H G, Cayan D R, et al. Warming and Earlier Spring Increase Western U. S. Forest Wildfire Activity [J]. Science, 2006, 313(5789): 940-943.
- [3] Flannigan M, B Stocks, B Wotton. Climate Change and Forest Fires [J]. Science of the Total Environment, 2000, 262(3): 221-229.
- [4] 中华人民共和国林业局. 国外森林防火概况[EB/OL]. http://www.gov.cn/zxft/ft107/content_956454.htm. 2008-04-28. (State Forestry Administration, P. R. China. Overview of forest fire prevention in foreign countries [EB/OL]. http://www.gov.cn/zxft/ft107/content_956454.htm. 2008-04-28. (in Chinese))
- [5] 魏书精,胡海清,孙龙.气候变化对我国林火发生规律的影响[J].森林防火,2011,(1):30-34. (WEI Shujing, HU Haiqing, SUN Long. Impact of Climate Change on Occurrence of Forest Fire in China [J]. Forest Fire Prevention, 2011, (1): 30-34. (in Chinese))
- [6] Helvey J D, J H Patric. Canopy and Litter Interception of Rainfall by Hardwoods of Eastern United States [J]. Water Resources Research, 1965, 1: 193-206.
- [7] Gerrits A M J, Savenije H H G, Hoffmann L, et al. Measuring Forest Floor Interception in a Beech Forest in Luxembourg [J]. Hydrol Earth Syst. Sci. Discuss, 3, 2323-2341, doi: 10.5194/hessd-3-2323-2006, 2006.
- [8] Asdak C, Jarvis P G, Gardingen P van, et al. Rainfall Interception Loss in Unlogged and Logged Forest Areas of Central Kalimantan, Indonesia [J]. Journal of Hydrology, 1998, 206: 237-244.
- [9] Asdak C, Jarvis P, Gardingen P V. Evaporation of Intercepted Precipitation Based on an Energy Balance in Unlogged and Logged for Estareas of Central Kalimantan, Indonesia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(3): 173-180.
- [10] Gerrits A M J. The Role of Interception in the Hydrological Cycle [M]. VSSD, Delft, The Netherlands, 2010.
- [11] 鲍文,包维楷,何丙辉,等.森林生态系统对降水的分配与拦截效应[J].山地学报,2004,22(4),483-491. (BAO Wen, BAO Weikai, HE Binghui, et al. Interception Effects of Forest Ecosystems to Precipitation: A Review [J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(4), 483-491. (in Chinese))
- [12] 石培礼,李文华.森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J].自然资源学报,2001,16(5):481-487. (SHI Peili, LI Weirhua. Influence of Forest Cover Change on Hydrological Process and Watershed Runoff [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 481-487. (in Chinese))
- [13] 张洪江,程金华,余新晓.贡嘎山冷杉纯林枯落物储量及其持水特性[J].林业科学,2003,39(5):147-151. (ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, YU Xinxiao. The Litter Reserves and Their Water Retaining Capacity under Abies Fabri Forest on the Gongga Mountain, Sichuan Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(5): 147-151. (in Chinese))
- [14] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, et al. A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests. I Derivation of the Model and Comparison with Observations in a Plantation of Corsican Pine [J]. Agricultural Meteorology, 1971, 9: 367-384.
- [15] Rutter A J, Morton A J, Robins P C. A Predictive Model of Rainfall Interception in Forests. II Generalization of the Model and Comparison with Observations in Some Coniferous and Hardwood Stands [J]. Journal of Applied Ecology, 1975, 12: 367-380.
- [16] Gash J H C, Wright I R, Lloyd C R. Comparative Estimates of Interception Loss from Three Coniferous Forests in Great Britain [J]. Journal of Hydrology, 1980, 48: 89-105.
- [17] Fernandez I, Cabanero A, Carballas T. Organic Matter Charges Immediately After a Wildfire in an Atlantic Forest Soil and Comparison with Laboratory Soil Heating [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 29: 1-11.
- [18] Mataix Solera J, Gomez I, Navarro Pedreño J, et al. Soil Organic Matter and Aggregates Affected by Wildfire in a Pinus Halepensis Forest in a Mediterranean Environment [J]. International Journal of Wildland Fire, 2002, 11: 107-114.
- [19] Chandler C, Cheney Ph, Thomas Ph, et al. Fire in Forestry: Forestfire Behavior and Effects [M. Volume I. John Wiley and Sons, New York, USA, 1983: 171-202.
- [20] Arturo J P Granged, Antonio Jordán, Lorena M Zavala, et al. Short-term Effects of Experimental Fire for a Soil under Eucalyptus Forest (SE Australia) [J]. Geoderma, 2011, 167-168, 125-134.
- [21] 吕刚,吴祥云.土壤入渗特性影响因素研究综述[J].农业工程科学,2008,24(7):494-499. (LV Gang, WU Xiangyun. Review on Influential Factors of Soil Infiltration Characteristics

- [J]. *Chese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24 (7): 494-499. (in Chinese)
- [22] Horton. Development of Vegetation after Fire in the Chamise Chaparral of Southern California [J]. *Ecology*, 1955, (36): 244-262.
- [23] 刘效雨, 刘益军. 火灾对毛竹林地土壤抗蚀性与渗透性的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*. 2007, 32(6): 114-118. (LIU Xiaoyu, LIU Yijun. Effect of Forest Fire on Soil Anticorrosion and Permeability in *Phyllostachyr Pubescens* [J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science)*, 2007, 32(6): 114-118. (in Chinese)
- [24] 李金涛, 刘文杰, 卢洪健. 土壤斥水性研究进展 [J]. *西南林学院学报*. 2010, 30(5): 82-87. (LI Jintao, LIU Wenjie, LU Hongjian. Research Advances in Soil Water Repellency [J]. *Journal of Southwest Forestry University*. 2010, 30(5): 82-87. (in Chinese)
- [25] J Mataix-Solera, A Cerdà, V Arcenegui, et al. Fire Effects on Soil Aggregation: A review [J]. *Earth Science Reviews*. 2011, 109, 44-60.
- [26] P R Robichaud, R D Hungerford. Water Repellency by Laboratory Burning of Four Northern Rocky Mountain Forest Soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232, 207-219.
- [27] DeBano L F. Water Repellent Soils: A State of the Art. US Department of Agriculture Forest Service General Technical Report [R]. PSW-46, Berkeley, CA, 1981, 21.
- [28] Garcia Corona R, Benito E, de Blas E, et al. Effects of Heating on Some Soil Physical Properties Related to Its Hydrological Behaviour in Two Northwestern Spanish Soils [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2004, 13: 195-199.
- [29] Zavala L M, Granged A P, Jordán A, et al. Effect of Burning Temperature on Water Repellency and Aggregate Stability in Forest Soils under Laboratory Conditions [J]. *Geoderma*, 2010, 158: 366-374.
- [30] Bryant R, Doerr S H, Helbig M. Effect of Oxygen Deprivation on Soil Hydrophobicity during Heating [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, 14: 449-455.
- [31] 胡海清, 刘洋, 孙龙, 等. 火烧对不同林型下森林土壤水分物理性质的影响 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 162-165. (HU Haiqing, LIU Yang, SUN Long, et al. Effect of Fire on Soil Hydrophysical Properties under Different Types of Forest Land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 162-165. (in Chinese)
- [32] 王兵, 魏文俊, 冷玲. 宁夏六盘山不同森林类型土壤贮水与入渗研究 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 2006, 27(3): 1-5. (WANG Bing, WEI Wenjun, LENG Ling. The Comparison Research of Soil Water-holding and Infiltration in Different Forest Type [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2006, 27(3): 1-5. (in Chinese)
- [33] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 1-5. (LIU Xia, ZHANG Guangcan, LI Xueli, et al. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 1-5. (in Chinese)
- [34] 李红霞, 张永强, 张新华, 等. 遥感 Penman-Monteith 模型对区域蒸散发的估算 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(4): 457-461. (LI Hongxia, ZHANG Yongqiang, ZHANG Xinhua, et al. Estimation of Regional Transpiration and Evaporation Using Penman-Monteith Equation [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(4): 457-461. (in Chinese)
- [35] Cornish P M, Vertessy R A. Forest Age induced Changes in Evapotranspiration and Water Yield in a Eucalypt Forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 242: 43-63.
- [36] Vertessy R A, Watson F G R, O'Sullivan S K. Factors Determining Relations between Stand Age and Catchment Water Balance in Mountain Ash Forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 13-26.
- [37] Lane P N J, Feikema P M, Sherwin C B, et al. Modelling the Long Term Water Yield Impact of Wildfire and Other Forest Disturbance in Eucalypt Forests [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, 25: 467-478.
- [38] 刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步研究 [J]. *地理学报*, 1978, 33(2): 112-126. (LIU Changming, ZHONG Junxiang. The Influence of Forest Cover upon Annual Runoff in the Loess Plateau of China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1978, 33(2): 112-126. (in Chinese)
- [39] Roberts S, Vertessy R, Grayson R. Transpiration from Eucalyptus Sieberi (L. Johnson) Forests of Different Age [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143: 153-161.
- [40] Kuczera G A. Prediction of Water Yield Reductions Following a Bushfire in Ash mixed Species Eucalypt Forests [J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 94: 215-236.
- [41] Haydon S R, Benyon R G, Lewis R. Variation in Sapwood area and Throughfall with Forest Age in Mountain Ash (*Eucalyptus regnans* F. Muell.) [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 187: 351-366.
- [42] Bosch J M, Hewlett J D. A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Change on Water Yield and Evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 3-23.
- [43] Marcar N E, Benyon R G, Polglase P J. Predicting the Hydrological Impacts of Bushfire and Climate Change in Forested Catchments of the River Murray Uplands: A review. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship.
- [44] Watson F G R., Vertessy R A, Grayson R B. Large scale Modeling of Forest Hydrological Processes and Their Long term Effect on Water Yield [J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13: 689-700.
- [45] Helvey J D. Effects of a North Central Washington Wildfire on Runoff and Sediment Production [Z]. *Water Resources Bulletin*, 1980, 16: 628-634.
- [46] Scott D F. The Hydrological Effects of Fire in South African Mountain Catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 150: 409-432.
- [47] LANE P N J, SHERIDAN G J, NOSKE P J. Changes in Sediment Loads and Discharge from Small Mountain Catchments Following Wildfire in South Eastern Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331: 495-510.

(下转第 145 页)

- [6] 于冷,戴有忠. 吉林省水资源投入产出分析[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 2(2): 136-140. (YU Leng, DAI Youzhong. Water Resource Input-output Analysis of Jilin Province[J]. Systems Engineering theory & Practice, 2000, 2(2): 136-140. (in Chinese))
- [7] 崔海燕. 黑龙江省水资源投入产出分析[D]. 东北农业大学, 2008. (CUI Haiyan. Analysis on Input-output of Water Resources on Heilongjiang Province[D]. Northeast Agricultural University, 2008. (in Chinese))
- [8] 付强,崔海燕,邢贞相. 基于投入占用产出理论的黑龙江省水资源经济分析[J]. 黑龙江大学学报, 2010, 1(1): 34-39. (FU Qiang, CUI Haiyan, XING Zhenxiang. Economic Analysis of Water Resources for Heilongjiang Province based on Input-Occupancy-Output Technique[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2010, 1(1): 34-39. (in Chinese))
- [9] 宋敏,田贵良. 产业用水关联与结构优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 566-570. (SONG Min, TIAN Guiliang. Industry Water-utilization Linkage and Industry Structure Optimization[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(4): 566-570. (in Chinese))
- [10] 彭江鸿,程伍群,路梅. 单位产值能耗模型在区域用水量预测中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(5): 25-28. (PENG Jianghong, CHENG Wujun, LU Mei. Application of Energy Consumption Per Unit of Output Value in Regional Water Consumption Forecasting[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5): 25-28. (in Chinese))
- [11] 钟淋涓,方国华,张建华. 江苏省国民经济各产业部门综合关联性和水资源使用效应分析[J]. 水资源保护, 2009, 25(4): 73-77. (ZHONG Linjuan, FANG Guohua, ZHANG Jianhua. Analysis of Integrated Relevance of Leading Industries and Effect of Water Resources Utilization on Each Department of National Economy in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(4): 73-77. (in Chinese))
- [12] 李景华. 基于投入产出局部闭模型的中国房地产业经济增长结构分解分析[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4): 784-789. (LI Jinghua. Structural Decomposition Analysis of the Growth of China's Real Estate Sector based on Partially Closed Input-output Model[J]. Systems Engineering theory & Practice, 2012, 32(4): 784-789. (in Chinese))
- [13] 秦昌波,张志霞,贾仰文,等. 基于投入产出模型的陕西省虚拟水分析[J]. 水利经济, 2012, 30(5): 1-6. (QIN Changbo, ZHANG Zhixia, JIA Yangwen, et al. Analysis of Virtual Water in Shanxi Province based on Input-output Model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2012, 30(5): 1-6. (in Chinese))
- [14] 李磊,吴晓华. 黑龙江省农产品虚拟水状况分析及对策研究[J]. 科学·经济·社会, 2008, 26(4): 41-46. (LI Lei, WU Xiaohua. Analysis and Policy on Virtual Water Condition of Agricultural Products in Heilongjiang Province[J]. Science · Economy · Society, 2008, 26(4): 41-46. (in Chinese))
- [15] 黄皎,高阳,李双成. 东北三省主要粮食作物虚拟水变化分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 505-512. (HUANG Jiao, GAO Yang, LI Shuangcheng. Temporal Variation of Virtual Water of Selected Agricultural Products in Northeastern China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(3): 505-512. (in Chinese))

(上接第 120 页)

- [48] Tan K S, Flower D J M., Flower D. M. An Event Runoff Coefficient Approach for Assessing Changes in Short-term Catchment Runoff Following Bushfires[Z]. Proceedings of the 33rd Hydrology and Water Resources Symposium, Brisbane, Engineers Australia, 2011.
- [49] Buckley T N, Turnbull T L, Pfautsch S, et al. Differences in Water Use between Mature and Post-fire Regrowth Stands of Subalpine Eucalyptus Delegatensis R. Baker[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 270: 1-10.
- [50] Langford K J. Change in Yield of Water Following a Bushfire in a Forest of Eucalypt Regnans[J]. Journal of Hydrology, 1976, 29: 87-114.
- [51] 蔡体久,周晓峰,杨文华. 大兴安岭森林火灾对河川径流的影响[J]. 林业科学, 1995, 31(5): 403-407. (CAI Tiejou, ZHOU Xiaofeng, YANG Weihua. The Effects of Forest Fire on Streamflow in Daxinganling [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(5): 403-407. (in Chinese))
- [52] 舒立福,田晓瑞,吴鹏超,等. 火干扰对森林水文的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 82-85. (SHU Lifu, TIAN Xiaorui, WU Pengchao, et al. Effects of Fire Disturbance on Forest Hydrology [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(6): 82-85. (in Chinese))