

森林植被变化(采伐)对小流域水文化化学 循环过程的影响

饶良懿^{1,2}, 王玉杰^{1,2}, 朱金兆^{1,2}, 卢建表³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

3. Ecological Solutions, Inc., NC 27606, USA)

摘要:森林不仅调节流域的水文循环过程而且对流域的生物化学循环过程也产生重要的影响。森林流域通过林冠层截留、地被物层过滤、土壤入渗以及河岸植被缓冲带等环节,对降雨径流中的泥沙、有机物、污染物质进行有效的过滤、吸收和净化,从而达到改善水质的目的。回顾了国内外森林植被变化对小流域水文化化学循环的影响研究,尤其是森林经营活动如采伐等对流域的河流水温、悬移质泥沙含量、溶解养分等方面的影响。多数研究认为森林采伐方式不同河流水温受影响程度不同;溶解养分与森林采伐的方式、地点及采伐流域的类型密切相关。特别指出河岸植被缓冲带在森林流域水质保护中的重要性,它的存在可以维持河流水温、有效防止和降低地表径流中携带的泥沙、污染物、有机质等进入河流,从而达到保护水质的目的。目前,我国在森林植被变化对流域水文化化学循环影响领域的研究还主要侧重于森林减少泥沙效应方面,在森林的水质保护效应方面,多数的报道都集中在森林生态系统各要素(如林冠、地被物、森林土壤等)对大气降水化学物质输入的影响,而对小流域尺度森林植被变化(如采伐)对水文化化学循环影响方面的研究开展得还很少。

关键词:森林植被变化(采伐);水文化化学循环过程;小流域

文章编号:1000-0933(2008)08-3981-10 中图分类号:S944 文献标识码:A

Effects of forest vegetation change(harvesting) on small watershed hydrochemical processes

RAO Liang-Yi^{1,2}, WANG Yu-Jie^{1,2}, ZHU Jin-Zhao^{1,2}, LU Jian-Biao³

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

2 The Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combat, Ministry of Education, Beijing 100083, China

3 Ecological Solutions, Inc., NC 27606, USA

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3981 ~ 3990.

Abstract: Forests not only play an important role in hydrological processes but affect biochemical circles on the small watershed scale. Through canopy interception, litter and soil infiltration, as well as riparian vegetation strips, forest ecosystems have effective functions. These functions include sediment removal, soil erosion control, moderation of shade and temperature of stream, and improvement of water quality resulting from filtering, absorbing, and purifying sediments, organic matters, and pollutants from surface runoff. This paper reviews effects of forest vegetation change on small watershed hydrochemical circles, especially the impacts of forest harvesting on water temperature, sediments, and dissolved nutrients.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30500389);国家“十一五”科技支撑计划课题资助项目(2006BAD03A18-02)

收稿日期:2007-06-20; **修订日期:**2007-12-29

作者简介:饶良懿(1976~),女,福建建瓯人,博士,副教授,主要从事森林生态水文和水土保持研究. E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30500389); The Eleventh Five-year National Key Technology R&D Program of China (No. 2006BAD03A18-02)

Received date: 2007-06-20; **Accepted date:** 2007-12-29

Biography: RAO Liang-Yi, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in forest ecohydrology and soil and water conservation, E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

Most of past studies in literature suggest that water temperature can be influenced by various forest harvesting patterns and that dissolved nutrients relate closely to harvesting patterns, sites, and catchment types. In forest watershed, riparian vegetation strips play a very important role in improving water quality. Riparian vegetation strips can maintain water temperature, prevent or reduce sediments, pollutants, and organic matters from entering stream channels. In order to provide better guidance for the national forest management, more researches on the effects of forest vegetation change (such as forest harvesting) on water quality are needed in China.

Key Words: forest vegetation change (harvesting); hydrochemical circles; small watershed

森林不仅调节流域水文循环过程而且对流域生物化学循环过程也产生重要的影响。森林流域通过林冠层截留、地被物层过滤、土壤入渗、河岸植被带等环节,对降雨径流中的泥沙、有机物质、污染物等进行有效的过滤、吸收和净化,从而达到改善流域水质、保护河流生态系统多样性的目的。森林流域植被变化如采伐等人类经营活动会对流域河流的水温、悬移质泥沙含量、溶解养分等产生重要的影响,进而影响流域的水文化学循环过程。目前,我国在森林植被变化对流域水文化学循环影响领域的研究还主要侧重于森林减少泥沙效应方面,在森林的水文化学循环效应研究方面,多数的报道都集中在森林生态系统各要素(如林冠、地被物、森林土壤等)对大气降水化学物质输入的影响,而对小流域尺度森林植被变化影响水文化学循环方面的研究开展得还很少。本文回顾了国内外森林植被变化对小流域水文化学循环的影响研究,尤其是采伐等森林经营活动对流域河流水温、悬移质泥沙含量、溶解养分等方面的影响,以为国内系统开展这方面的研究提供有益的参考。

1 森林植被变化(采伐)对水温的影响

森林采伐方式对流域河流水温有很大的影响。Brown 和 Krygier^[1]20 世纪 70 年代在美国俄勒冈州海岸地带的 Alsea 实验流域进行了不同森林采伐方式对溪流水温影响的研究。该项研究选择了 3 个流域进行实验:在 Deer Green 流域(303.51 hm²)进行择伐,森林择伐面积占流域面积的 1/4,在溪流边缘留有 15.24 ~ 30.48m 宽的植被缓冲带;而在第 2 个流域 Needle Branch(70.82 hm²)则进行完全的皆伐;第 3 个流域 Flynn Green(202.34 hm²)未采取任何措施,作为对照流域。研究结果表明:在 Deer Green 流域进行的森林择伐未对溪流水温造成影响,原因是溪流边缘的缓冲带发挥了作用,由于植被缓冲带的庇荫作用使得溪流的水温未受到森林择伐的影响;而在皆伐的 Needle Branch 流域水温则发生了明显的变化,在流域植被残余物清除后的第 1 个夏季,溪流的月平均温度提高了 7.78℃,同年年最高温度提高了 15.56℃。其后,随着河岸植被的逐渐恢复,溪流的年最高温度和月平均最高温度都有所降低。

加拿大学者 Prevost 等人^[2]研究发现森林流域每周温度变化在 2~7℃,而对比流域的水温常达到 25℃ 以上;Bourque and Pomeroy^[3]对 4 个森林流域采伐后的水温进行了测定,结果发现即使保持了河岸植被缓冲带,河流水温仍稍有升高,他们认为水温升高的原因是砍伐地带温度较高的亚表层水流进入了河流;Mellina 等人^[4]发现即使将所研究河流的河岸植被覆盖率降低一半,下游方向的水温仍较低,他们认为这是由于河流上游存在的小湖使得上游的水温要比中下游河段的水温来得高;Curry 等人^[5]发现没有植被缓冲带时秋季水温更高,但当缓冲带达到 20m 宽时,不能观测到采伐措施对水温的影响,同时他们也发现鲑鱼产卵栖息地河流中的水温与地表水水温近似。

一些模型被应用来研究森林采伐对河流水温的影响。如 Caissie 等人^[6]同时采用逻辑斯蒂克回归模型和统计模型研究了加拿大 New Brunswick 的 Catamaran 河流最大日水温和气温之间的关系。统计模型包括一个周期性循环的正弦模块以及一个二级马尔科夫程序,用来计算短期水温的偏差;St-Hilaire 等人^[7]也应用改进的 CEQUEAU 参数概念模型计算热量与亚表层径流的横向水平流来模拟皆伐地点地表水温升高对 Catamaran 河流水温的影响;Mitchell^[8]则基于月数据开发了一个回归模型用来预测无缓冲带情况下森林流域皆伐对河

流水温的影响。

2 森林植被变化(采伐)对水中溶解养分的影响

森林采伐干扰了流域养分循环的过程,森林采伐后随着排水量和泥沙量的增加,流域中的养分损失加大,对河流水质产生不同程度的影响。据 J. D. Schreider 等报道,泥沙中的养分总量与泥沙总量成线性关系,是河水中泥沙含量、泥沙养分含量以及暴雨径流的函数。

Likens 等人^[9]在美国新罕布什尔州的 Hubbard 实验流域进行了大面积森林采伐对流域养分释放影响的研究。该研究对其中一个森林小流域进行皆伐,另一个流域则保持原貌作为对照。观测结果表明:皆伐后流域溪流的养分净流失量比未受干扰流域增加数倍到数十倍,皆伐流域水体中 Ca^{2+} 、DOC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等溶解离子的含量要比对照流域高;加拿大的 Feller 等^[10]报道,局部森林流域被采伐或火烧后,各种化学元素均呈增加趋势,增加最明显的是 K^+ 和 NO_3^- ,其他养分的损失量分别为 N、P、K、Mg 不足 $10\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, Na^+ 、 Cl^- 不足 $20\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$, Ca^{2+} 不足 $30\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$;挪威的 Haveraaen^[11]报道,采伐使 N 的损失量由伐前的 $1.5\text{kg}/\text{hm}^2$ 增至 $7\sim 8\text{kg}/\text{hm}^2$ ($\text{NO}_3\text{-N}$ 约 $6\text{kg}/\text{hm}^2$), K 由 $2\text{kg}/\text{hm}^2$ 增至 $12\sim 13\text{kg}/\text{hm}^2$, $\text{SO}_4\text{-S}$ 由 $18\text{kg}/\text{hm}^2$ 增至 $24\text{kg}/\text{hm}^2$, Cl^- 由 $16\text{kg}/\text{hm}^2$ 增至 $35\text{kg}/\text{hm}^2$;日本在滋贺县花岗岩地区赤松流域(6hm^2)观测结果表明:降水通过林冠或沿树干流下,然后由溪流流出,在此过程中化学成分的含量已发生变化,林内降雨和树干径流中的钠、钾、钙、镁、磷、硝态氮等的含量均有所增加,且树干径流增幅较大,在地表径流中钠含量有较大增加,而氨态氮、硝态氮含量有较大的减少,降雨在经过森林流域时,能增加各种化学成分,也能除去某些原有的溶解成分^[12];美国 Coweeta 森林水文实验站配对接流域的研究也表明:森林采伐后大多数营养物的富集量变化很小,而当年径流量增加时水体中营养物则会大量增加^[13]。

此外在新西兰和澳大利亚也开展了不同土地利用类型对流域氮、磷流失的影响研究。新西兰^[14]对降雨量较大情况下不同土地利用流域的硝化氮、总磷流失研究表明:降雨量大的情况均发生硝化氮、总磷大量流失现象,不同土地利用流域的流失量不同,其中原生林流域总磷和硝化氮的流失量均较草地流域低,而辐射松林流域的总磷流失量最低,如表 1 所示。

表 1 不同土地利用类型对硝化氮、总磷流失的影响^[14]

Table 1 Effects of different land uses on the losses of nitrogen and phosphorus^[14]

不同土地利用类型 Different land uses	总磷 Total phosphorus ($\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$)	硝化氮 Nitrate nitrogen ($\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$)
原生林流域 Native forest catchment	0.2009	0.0115
草地流域 Pasture catchment	0.2929	0.1356
辐射松林流域 P. radiata catchment	0.0706	0.0444

澳大利亚对 Cropper Creek、Maroondah、Daylesford 及 Yambulla^[15~18]等 4 个森林流域的实验研究表明:当径流量仅占流域总降雨量的 7%~14% 时,河流中氮的流失量非常低。

采伐方式、流域所在地点及森林植被类型不同森林采伐对河流水中溶解养分的影响也不同。如前苏联在几公顷大小的实验流域对几百年生的冷杉山毛榉天然混交林采用皆伐和群状择伐方式研究溪流中养分含量的变化。在皆伐流域,由于溪流的水温上升,生物活动旺盛,其 BOD(生化需氧量)为群状择伐流域的 1.11~1.28 倍,溪流水中的 N 含量为群状择伐流域的 3~4 倍,皆伐流域在最大流量时的 BOD 和最小流量时的 N 含量分别为未伐区的 1.67 倍和 2.7 倍,而群状择伐流域溪流中养分含量则未有明显的变化^[19]。森林采伐对河流水中溶解养分的影响也与流域所在的地点有关。例如,在阿巴拉契亚中南部森林流域的研究表明:水体中富集的 NO_3^- 、 K^+ 及其它元素的变化很小,对下游水质不会造成很大影响^[13];相反地,对该区北部硬木林森林流域的研究表明:森林砍伐会导致水体中一些营养元素的大量增加^[20];森林采伐对流域水质的影响也因森林流域类型而异。例如:加拿大北部泰加林流域(Boreal Shield)和北部草地流域(Boreal Plain)的流域特征各异。北部泰加林流域的湖泊小而深,蓄水时间短,水体中的 DOC(溶解性有机碳)、总磷(P)、总氮(N)都要小于北部草地流域。研究表明北部泰加林流域森林植被变化对水质的影响要大于富营养化的北方草地流域。森林

采伐后,北部泰加林流域水体中的 DOC、P 及 N 的含量都增加了^[21,22],而北部草地流域的 DOC 及 N 含量都未发生变化,仅有 P 的含量增加了^[23]。而发生火灾后两种类型流域水体中 DOC、P 及 N 的含量都相应增加^[24]。

国内在森林对河流水质影响方面的研究则是从 20 世纪 50 年代开始的,刚开始也只侧重于森林对河流泥沙的影响,而对水化学性质影响的研究开展较少。随着森林水文学的发展,20 世纪 60 年代中国科学院等一批森林生态系统定位研究站的建立,森林与水质的研究也逐步被列为主要的研究内容,从 70 年代起逐渐开展了森林对大气降水、水体污染物净化方面的研究,如中国科学院南京土壤研究所、中国林业科学研究院、中南林业学院等,开展了森林生态系统对大气降水输入输出中 N、P、K、Ca、Mg 等养分元素影响的研究。卢俊培^[25]在海南岛尖峰岭半落叶季雨林区的研究表明:林外径流的化学流失量比林内的大 260 ~ 340 倍,森林对径流具有一定的物理过滤作用和化学调节作用,所以一般化学物质的浓度是林内低于林外,也就是说森林可以减少地表径流的化学侵蚀;潘维伟^[26]在湖南省会同县等地对人工杉木林及毛竹林森林生态系统的养分循环进行了研究,并取得了初步结果;中国林业科学院林业研究所马雪华^[27]在热带和亚热带的研究表明:该地区降雨对林冠层的淋溶量较高,一般林内雨的养分量较林外雨高 1.5 ~ 4.5 倍。每年通过林冠的淋溶作用输入林内的养分总量中以 K、N 最多,其次是 Ca 和 Mg, P 最少。以热带季雨林和亚热带人工杉木林、马尾松林林冠的 K、Mg、Ca、P 养分总量来比较,前者的淋溶量较后者多,尤其是 P 的淋溶量,前者较后者大 10 倍左右;东北林业大学詹鸿振等^[28]在小兴安岭原始红松林区的研究也表明林外雨中营养元素含量很低,最大含量 Ca 仅为 5.399mg/L、K 仅为 2.671mg/L。元素含量的季节变化也不明显,林内雨中营养元素含量明显高于林外雨,含量最大的是 Ca、K、Mg,且林内穿透雨量每年给林地带来大量的养分元素。同时,林内地表径流中养分的含量高于林内雨,而树干流中的养分含量最高;此外冯延文等^[29]对北京郊外森林小流域的大气降水的水质及其变化过程进行了研究;陈步峰等^[30]对海南岛尖峰岭热带山地雨林集水区岩石、土壤及水化学质含量的检测,雨林集水区降雨、总径流水体 COD、NH₄⁺-N、酚、Zn、Cu、Pb、Cd、Ni 的加权浓度含量远低于地面水质类标准;水质迁移中以溶解、水解及氧化为特征;在降雨-径流水循环中,山地雨林冠层减少降雨中 COD、NH₄⁺-N、酚、Zn、Cd、As、Ni、Fe 浓度含量范围在 32% ~ 82%;土壤层对进入林内的雨水中的 COD、Cu、Zn、Mn、Fe 产生吸附效应,雨林系统对降雨中 COD、NH₄⁺-N、酚、Cu、Zn、Cd、Fe 贮滤强度分别达 44.4%、23.7%、40.2%、8.9%、57.0%、27.7%、88.3%,热带山地雨林生态系统具有显著的水化学贮滤净化的生态效应;据谭芳林等^[31]在秦岭辛家山锐齿栎林生态系统对水质的影响研究结果表明:大气降水携带各种物质进入锐齿栎森林生态系统并与冠层作用后,所形成的穿透降水中各种重金属有害元素的浓度和携带量 Zn、Cu、Cd 在穿透降水中的浓度和携带量均小于大气降水。林冠层对这 4 种重金属元素均表现为吸附作用。经过土壤层并以径流输出时,各重金属元素的浓度和携带量发生了很大变化,Zn、Pb、Cd 在径流中的浓度均降低,Cu 的浓度有所升高。携带量则全部减小,变化率以 Pb 为最大,Cu 的变化最小。大气降水在经过系统各个层次后的 pH 值变化为大气降水 6.51、穿透降水 6.75、枯穿水 6.54、径流水 7.29。表明 pH 值为 6.51 的大气降水在经过系统的冠层和枯落层时变化不大,但在经过了土壤层后,径流水的 pH 值升高了 0.78;刘世海等^[32,33]在北京密云水库集水区人工水源保护林降水化学性质研究表明,大气降水化学元素含量在不同时段内变幅较大,各元素含量的大小排序为 Ca > N > K > Mg > Na > P > Fe > Zn > Mn。大气降水在经过 3 种类型的水源保护林林冠层后,所测定的化学元素含量变化不一。但总的结果来看,化学元素含量升高的元素较多,且化学元素含量之和无论是林内穿透降雨还是树干茎流均呈升高趋势;欧阳学军等^[34]对鼎湖山森林生态系统水质状况进行了调查,通过对地表水来源过程环节的水化学分析比较表明:大气降水、穿透水、土壤溶液(30cm 层和 80cm 层)和地表水水样的 pH 值呈现“M”形变化。酸雨和土壤表层酸化是该区地表水 pH 值偏低的主要原因。地表水和 30cm 土壤溶液中的 Al 浓度分别是大气降水的 5 倍和 8 倍,地表水中的 Al 主要来源于酸雨对土壤的淋溶。地表水中的 Na 主要来源于大气降水。大气降水 Pb 浓度是地表水的 17 倍,林冠吸收富集和土壤固定吸附使地表水中的 Pb 大幅度降低。穿透水和土壤溶液中的 Mn、K、Ca、Mg、Sr 比大气降水和地表

水浓度高,反映了元素被酸雨淋溶、活化和被植物、土壤吸收吸附的过程;陈步锋等^[35]在2002~2003年对顺德大良大岭山常绿针阔混交林集水区水循环过程进行了定位监测,研究表明:大气湿沉降化学物质经过林冠后,穿透雨的总P、K、Zn、Pb浓度分别增加了1、2、7、1倍,Al、Ca、Cu浓度减少了89.8%、40.7%、30.5%;土壤105 cm深度渗透水 PO_4^{3-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 阴离子的总浓度相对15 cm深减少33.5%;Cu、Zn、Pb、Cd浓度相对15 cm深的渗透水分别减少了62.5%、64.5%、38.9%、84.6%。研究认为森林土壤的储虑机制对于输出环境的径流水质有显著改善作用。

在森林植被变化(如采伐等人为干扰活动)对河流水质影响研究方面,少数的例子如上世纪80年代内蒙古大兴安岭根河森林生态系统定位站开展的落叶松林采伐方式及强度对流域泥沙和水质的影响。这些研究为我国森林生态系统水文化学循环过程影响机制的探索奠定了基础,但单一要素的研究不能反映小流域尺度森林植被变化(自然和人为干扰)对水文化学循环过程的影响,必须借助配对集水区(paired catchment)实验手段,开展小流域尺度上系统、全面的研究。

3 森林植被变化(采伐)对河流泥沙的影响

森林生态系统群落结构特征决定了森林植被在控制土壤侵蚀、减少水流泥沙含量方面具有较强的功能。林冠层、地被物层能够截留降雨从而使得林内降雨减少,并同时降低降雨的动能,减少了雨滴对地表的侵蚀及泥沙的搬移;地被物层能够阻延地表径流速率,减轻对地表土层的冲刷;植被的存在改良了生态系统表层土壤的理化性质,增加了土壤的孔隙度,有利于水分入渗,保持土壤水分;携沙水流经过地被物层被充分过滤,减少了进入水体的水流中泥沙的含量;植被根系的网固作用使得森林土壤的抗冲、抗蚀性能大大增强。

Loughlin在韦斯特兰北部森林小流域研究了特大暴雨期间森林砍伐对河流泥沙含量的影响,结果表明:森林采伐对流域产沙有很大影响,皆伐流域大约95%的泥沙被河水携带走,而未扰动流域的泥沙量仅站总泥沙含量的5%;Hewlett^[36]研究了森林采伐对流域产沙量的影响,指出森林采伐后4a内,土壤侵蚀量增加55%,且细沟浅沟迅速发育。许多流域实验研究表明道路建设是森林流域产沙的主要来源^[37~40]。如Kreutzweiser和Capell^[41]在加拿大安大略Turkey Lakes流域选择有代表性的6个地点研究了森林采伐对流域泥沙的影响,结果表明:非有机质部分的最大产沙率发生在河流下游道路建设活动区及河岸区水流沿集材机械痕迹进入河流的区域,而最小产沙率则发生在有防护林的地点。因此,采伐道路的位置及其维护对降低森林流域河流泥沙量、保护河流水质至关重要。

国内在森林植被变化对泥沙影响方面也开展了较多的研究。如西峰水土保持试验站^[42]1956~1962年在子午岭合水川及附近的党家川,选择了两个对比森林流域:王家沟流域(面积40.08km²,森林覆盖率90%)和党家川流域(面积45.7km²,森林覆盖率8%),观测到在3次暴雨洪水条件下(降水量分别为28.6、56.9、119.6mm),两个流域的平均含沙量分别为0.08、71.4kg/m³,侵蚀模数分别为0.02t/km²和127t/km²;马雪华^[43]研究了森林采伐与河流泥沙悬移质的关系,认为在岷江上游采伐森林,可使河流年平均含沙量增加1~3倍;魏秉玉^[27]通过小流域实验资料认为森林减沙效应随森林覆被率的增加而增加的情况非常明显,即使在森林覆被率不太大的情况下,减沙效果也是显著的。森林覆盖率达30%的流域较无林地流域减少输沙量60%,森林小流域基本上不存在水土流失现象;许静仪^[44]通过对湖北黄冈地区水土保持试验站实测资料的分析得出:森林可消减年侵蚀深度的94.7%,而且降水量分别为32.2mm和121.6mm时,森林拦沙作用只下降了3.2%,说明森林的减沙作用是稳定的;侯喜禄^[45]通过径流小区试验研究认为:与农地相比,柠条林地减少泥沙量99%,刺槐林地减少泥沙量98%~99%,而沙打旺灌丛可减少95%~95%的泥沙量;刘永宏等^[46]对呼和浩特大青山不同森林类型的径流和泥沙流失的观测结果认为覆盖率较高的天然白桦次生林与人工油松成林的保水保土能力最强,涵养水源效果最好。与对照荒坡相比,白桦林、油松成林分别减少96.49%和97.60%的地表径流,而油松幼林与灌木林均减少64%左右。白桦林、油松成林减少地表冲刷的百分比均在99.9%以上,几乎完全控制了土壤流失;刘向东等^[47]在六盘山的研究表明:森林覆盖率较高的香炉河流域(85%)和香水河流域(91.6%)年平均含沙量分别为0.79 kg/m³和0.97 kg/m³,分别为森林覆盖率较低的颍

河(31.7%)和清水河(24.3%)流域的6.8%~8.5%、8.4%~9.2%。

4 河岸区森林植被变化(采伐)对小流域水文化学循环的影响

大多数小流域水文化学循环过程研究中都比较注重影响坡面径流及暴雨径流的因素,河岸区是将坡面径流和地表径流输送到河流中的桥梁、廊道,因而河岸区在小流域的水文化学循环过程中也扮演着相当重要的角色。河岸区森林植被通过过滤、调节由陆地生态系统输入河溪生态系统的各种有机物和无机物(如地表水、泥沙、枯枝落叶、果实等)进而影响河溪中水、泥沙、化学物质、营养元素的含量及时空分布规律。例如, Hewlett^[48], Bond^[49]等人的研究表明:河岸区植被的蒸腾蒸发作用能够促进对河水的汲取,导致径流的减少;澳大利亚及南非开展的研究也表明河岸区植被要比流域其他部分的植被更能对水分进行有效的利用^[50,51]。河岸区森林植被变化(采伐)会通过影响河流泥沙、水质、水温等因子的特征而对小流域的水文化学循环过程产生重要的影响。

4.1 河岸区森林植被变化(采伐)对泥沙的影响

研究表明:河岸植被能够有效移除地表径流中的泥沙^[52]。在美国北卡罗莱那州,研究人员估计84%~90%的农田泥沙可被附近的落叶硬木林河岸植被带拦截^[53],砂砾沉积在河岸植被带边缘,而粘粒则沉积在林中;在佐治亚州的 Little River 沿岸,研究人员发现河岸森林在过去的100a里每年每公顷能积蓄351t至531t泥沙^[54];美国海岸平原的河岸植被缓冲带由与河流相邻的10m宽林带(A区)、坡下部45~50m宽的人工松林带(B区)及与农田相临的8m宽的草地过滤带(C区)组成,在B区的松林内实行3种不同的管理方式:未受影响的成熟林、皆伐和择伐。Sheridan 等人^[55]经过4a的观察研究发现:3种不同管理方式都对水流和沉积物有很显著的影响。最显著的减少作用发生在C区草地过滤带,通过该区的径流减少量达到了56%~72%,沉积物聚集率在3种不同森林管理模式下同样也显著减少,平均有73%的沉积物被排除转移,其中63%发生在C区草地过滤带;Pearce 等人^[56]通过实验室降雨模拟发现:植被缓冲带的宽度在减沙效益方面比高度的变化更为显著,但是高度增加的减沙效益将随着宽度的加大而增强。

4.2 河岸区森林植被变化(采伐)对水质的影响

河岸森林能够有效移除地表径流中的氮和磷含量。Lowrance^[57]及 Pinkowski^[58]研究显示,沿岸森林植被带作为一个营养元素的汇集地,能有效降低由河岸农田进入溪流的营养元素N、P、K等的浓度,其中对氮和磷的滞留效果最好;美国农业部研究人员20世纪80年代早期在佐治亚州的 Tifton 开展的研究认为河岸落叶林能减少68%的农田地表径流中氮的含量^[59];河岸植被带可以移除地表径流中溶解养分的含量,尤其是N的含量,如 Pinkowski 等人在伊利诺伊斯州的研究表明植被带能减少地下水中48%~100%的N^[58];在马里兰州的 Chesapeake Bay 西海岸, Peterjohn 和 Correll 等人发现河岸缓冲带可移除89%的氮含量,尤其是在缓冲带18.6m处截留的氮量最多^[60];而在马里兰东海岸, Jordan 等人发现河岸缓冲带可移除农田地表径流中95%的氮^[61];在弗吉尼亚州里士满东北部的 Nomini Creek 流域的研究表明河岸森林植被可以减少地表径流中48%的氮^[62];Peterjohn 和 Correll^[60]调查发现,氮在岸边植被带的截留率为89%,而在农田的截留率仅为8%,磷在植被带和农田的截留率则分别为80%和41%;Magette 等人^[63]研究发现缓冲带能够减少地表径流中27%的总磷。因此,河岸森林植被的采伐会使河岸区移除地表径流中氮和磷含量的功能明显下降,从而对河流水质造成影响。

4.3 河岸区森林植被变化(采伐)对水温的影响

河岸植被对河溪的水温具有重要影响。河岸植被的存在可以吸收白天太阳辐射的大部分光线或使其反射回大气层,同时截留夜间流失的长波辐射,从而使得河溪水温、蒸发、大气温度及湿度等气象因子发生变化。河岸植被的走向、宽度、高度、密度、覆盖度及林冠的结构等都直接影响河溪的水温。研究表明采伐沿岸森林植被会使日最高温度和河溪平均水温增加2~10℃^[1,64,65]。美国东部森林流域的实验研究也表明移除临近河溪的森林林冠会增加到达河流表面的太阳辐射量,从而造成夏季河水水温增加1.1~6.1℃^[66,67];而在西部森林流域采伐沿河植被后,河流水温增高更多^[1]。因此,学者们研究认为沿河设置植被缓冲带能够有效降低河

流水温^[68,20]。例如,在加拿大 New Brunswick 省,林业部门要求在大于宽度 $>0.5\text{ m}$ 的所有连续河溪设置 30 m 的缓冲带以防止过多的太阳辐射造成河流水温升高^[69]。此外,河溪水温受影响的程度也与河溪本身的大小密切相关。一般来说,小河溪容易受河岸植被的影响,仅 $1\% \sim 3\%$ 的太阳光能到达河水表面,河溪的生产力较低;而随着河溪级别的增加,两岸植被间空隙加大,到达河水表面的太阳光可达到 $10\% \sim 25\%$,河溪的生产力相应提高;对于较大河溪说,到达河溪表面的太阳光则接近空旷地可达到 $30\% \sim 100\%$ 。研究表明:水温的日变化与河流表面的能量交换及河溪暴露在阳光下的长度有关,低级别的小溪流对较高的水温更为敏感,尤其是那些地形平坦的小河溪。

5 结语

森林植被变化(如采伐等人类森林经营活动)会对流域的河流水温、水质、营养物质等水文化学循环过程产生重要的影响。多数研究认为森林采伐方式不同河流水温受影响程度不同;水中溶解养分与森林采伐的方式、地点及采伐流域的类型密切相关;河岸植被带在森林流域水质保护中扮演重要的角色,它的存在可以有效维持河流水温、防止和降低地表径流中携带的泥沙、污染物、有机质等进入河流而达到水质保护的目的。目前,我国在森林植被变化对小流域水文化学循环影响领域的研究还处于起步阶段,主要采用的研究手段大多为坡面径流小区(plot study)对比实验,如有林地、无林地以及各种植被类型林地的对比研究,配对集水区实验研究特别是长期的定位研究开展得相对较少,研究结果虽然说明了一些问题,但不能真实地反映小流域尺度上森林植被变化对水文化学循环过程的影响,因而不能将坡面尺度的研究成果可靠地外推,使得研究结果的应用具有很大的局限性。今后应加强以下几方面的研究工作:

5.1 开展长期的定位集水区实验研究

依据我国主要气候带和森林植被类型区,开展不同类型森林集水区长期定位研究。制定森林集水区定位观测的统一标准,使得各类型区的观测数据能够具有较好的可比性,以为大尺度区域森林水文化学循环过程机制的探索提供试验研究基础。

5.2 加强森林经营活动对流域水文化学循环过程特别是水质的影响研究

开展不同森林经营活动,如不同的采伐方式、采伐部位、采伐面积和比例、采伐时间与季节、不同植被类型组成、不同土地利用类型组成(如森林与草地面积不同比例组成)等对流域水文化学循环过程特别是水质的影响研究。

5.3 重视河岸区植被带在森林流域水文化学循环过程中的作用

河岸植被带是流域水陆交错带,在流域水文化学循环过程中扮演重要的角色。多数研究已表明它在保护流域河流水质、维护河流水温、保护河流生物多样性、提供动植物栖息地等方面具有多项重要的功能,也已被欧美等国家的农业、林业、环境保护部门列为最佳保护措施(Best Management Practices),目前我国在这方面开展的研究工作还不多,应引起相当的重视。

5.4 其它干扰活动如火灾、污水排放、森林休闲游憩活动、林业道路建设等对森林流域水文化学循环的影响等。

不仅是采伐等森林经营活动会对流域的水文化学循环过程产生影响,其它潜在的影响因素还包括火灾、污水排放、森林休闲游憩活动、林业道路建设等自然或人为的干扰。例如,随着我国森林旅游业的兴起,越来越多的休闲游憩活动在林区开展,若保护不当势必会造成森林环境污染、土壤流失加剧等后果,进而对森林流域的水文化学循环过程产生影响。目前我国在这些方面的研究和报道都相对较少,应该加强。

References:

- [1] Brown G W, Krygier J T. Effects of clearcutting on stream temperatures. *WaterResour. Res.*, 1970, 6: 1133 — 1140.
- [2] Prevost M, Plamondon A P, Belleau P. Effects of drainage of a forested peatland on water quality and quantity. *Journal of Hydrology*, 1999, 214: 130 — 143.
- [3] Bourque C P-A, Pomeroy J H. Effects of forest harvesting on summer stream temperatures in New Brunswick, Canada: an inter-catchment, multiple-

- year comparison. *Hydrology and Earth Systems Science*, 2002, 5: 599 — 613.
- [4] Mellina E, Moore R D, Hinch S G, Macdonald J S, Pearson G. Stream temperature responses to clearcut logging in British Columbia: the moderating influences of groundwater and headwater lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59: 1886 — 1900.
- [5] Curry R A, Scruton D A, Clarke K D. The thermal regimes of brook trout incubation habitats and evidence of changes during forestry operations. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 1200 — 1207.
- [6] Caissie D, Jolicoeur S, Bouchard M, Poncet E. Comparison of streamflow between pre and post timber harvesting in Catamaran Brook (Canada). *Journal of Hydrology*, 2002, 258: 232 — 248.
- [7] St.-Hilaire A, Morin G, El-Jabi N, Caissie D. Water temperature modelling in a small forested stream: implication of forest canopy and soil temperature. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2000, 27: 1095 — 1108.
- [8] Mitchell S. A simple model for estimating mean monthly stream temperatures after riparian canopy removal. *Environmental Management*, 1999, 24: 77 — 83.
- [9] Likens D, *et al.* Effects of forest cutting and herbicide treatment budget in the Hubbard Brook watershed ecosystem. *Ecological Monographs*, 1970, 40(1): 24 — 47.
- [10] Feller M C, Kimmins J P. Effects of clearcutting and slash burning on streamwater chemistry and watershed nutrient loss in southwestern British Columbia. *Water Resources Research*, 1984, 20: 29 — 40.
- [11] Haverlaen O. The effect of cutting on water quantity and water quality from an East Norwegian coniferous forest. *Medd. Norsk Inst. Skogforsk*, 1981, 36(7), Oslo, As. 27.
- [12] Wang L X, Zhang Z Q. Impacts of forest vegetation changes on hydrological and ecological regime. *World Forestry Research*, 1998, 11(6): 14 — 23.
- [13] Swank W T. Stream chemistry responses to disturbance. In: Swank W T and Crossley D A Jr eds. *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. Ecological Studies*. New York: Springer-erlag, 1988, 66: 339 — 357.
- [14] McColl R H S, White E, Gibson A R. Phosphorus and nitrate run-off in hill pasture and forest catchments, Taita, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1977, 11: 729 — 44.
- [15] Hopmans P, Flinn D W, Farrell P W. Nutrient dynamics of forested catchments in southeastern Australia and changes in water quality and nutrient exports following clearing. *Forest Ecology and Management*, 1987, 20: 209 — 231.
- [16] Guthrie H B, Attiwill P M, Leuning R. Nutrient cycling in a *Eucalyptus obliqua* (L'Herit.) forest II. A study in a small catchment. *Australian Journal of Botany*, 1978, 26: 189 — 201.
- [17] Feller M C. Catchment nutrient budgets and geological weathering in *Eucalyptus regnans* ecosystems Victoria. *Australian Journal of Ecology*, 1981, 6: 65 — 77.
- [18] Turner J, Lambert M, Knott J. Nutrient inputs from rainfall in New South Wales State Forests. *State Forests of New South Wales*, 1996, Research Paper No 17. 49.
- [19] Yu Z M, Wang L X, eds. *Benefits of water conservation forests*. Beijing: Chinese Forestry Publishinghouse, 1999.
- [20] Hornbeck J W, Martin C W, Pierce R S, Bormann F H, Likens G E and Eaton J S. Clearcutting northern hardwoods: Effects on hydrologic and nutrient ion budgets. *Forest Science*, 1986, 32(3): 667 — 686.
- [21] Steedman R J. Effects of experimental clearcut logging on water quality in three small boreal forest lake trout lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57: 92 — 86.
- [22] Enache M, Prairie Y T. Paleolimnological reconstruction of forest-fire induced changes in lake biogeochemistry (Lac Francis, Abitibi, Quebec, Canada). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57(Suppl. 2): 146 — 154.
- [23] Prepas E E, Pinel-Alloul B, Planas D, Méthot G, Paquet S, Reedyk S. Forest harvest impacts on water quality and aquatic biota on the Boreal Plain: introduction to the TROLS lake program. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58: 421 — 436.
- [24] McEachern P, Prepas E E, Gibson J J, Dinsmore P. The forest fire induced impacts on phosphorus, nitrogen and chlorophyll a concentrations in boreal sub-arctic lakes of northern Alberta. *Can. Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, 57 (Suppl. 2): 73 — 81.
- [25] Lu J P. Ecological effects of semi-deciduous forests in Jianfengling of Hainan Province. *Tropical Forestry Science*, 1986, (1): 1 — 6.
- [26] Pang W S. Study on nutrient cycle of plantations of Chinese fir. *Journal of Central South Forestry University*, 1983, 3(1): 1 — 17.
- [27] Ma X H. Forests and water quality. In: *Forest hydrology and watershed management committee of China, National forest hydrology semina proceedings*. Beijing: Mapping Publishinghouse, 1989. 31 — 35.
- [28] Zhang H Z, Liu C Z, Li Z Q, *et al.* Hydrological effect and water quality in virgin *Pinus koiensis* forest in Xiaoxing'anling Forest Region. In: *National forest hydrology semina proceedings*. Beijing: Mapping Publishinghouse, 1989. 63 — 70.
- [29] Feng Y W, Feng Z W, *et al.* Water quality and change process of atmospheric precipitation at forest small catchment of Beijing suburb, China. *Advances in Environmental Science*, 1999, 17(4): 112 — 119.
- [30] Chen B F, Lin M X, Qiu J R, *et al.* Effect of Tropical Mountain Rainforest Ecosystem on Water Quality of Precipitation. *Chinese Forestry Science Research*, 1999, 12(4): 333 — 338.
- [31] Tang F L, Lei R D, Wang Z H. Effects of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* Forest Ecosystem on Water Quality. *Fujian Forestry Science*, 1999, 26,

- (2):1—5.
- [32] Liu S H, Yu X X. Chemical property of precipitation in Robinia pseudoacacia Water Resources Protection Forest in Miyun Reservoir Watershed, Beijing. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, 10, (5): 13—15.
- [33] Liu S H, Yu X X, Yu Z M. Chemical property of precipitation in Pinus tabulaeformis water resource protection forest in Miyun Reservoir watershed. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12, (5): 697—700.
- [34] Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, *et al.* Analysis on Runoff Water Quality in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (9): 1373—1379.
- [35] Chen B F, Chen Y, Yin T G, *et al.* Study on the Water Quality of Urban Forest Ecogystem in the Pearl River Delta. *Forest Research*, 2004, 17(4): 453—460.
- [36] Hewlett J D, Helvey J D. Effects of forest clearfelling on the storm hydrograph. *Water Resources Research*, 1970, 6(3): 768—782.
- [37] Swift L W. Forest access roads: design, maintenance, and soil loss. In Swank W T and Crossley D A Jr, eds. *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. Ecological Studies*. New York: Springer-Verlag, 1988. Vol(66), 313—324.
- [38] Iroume A. Assessment of runoff and suspended sediment yield in a partially forested catchment in Southern Chile. *Water Resources Research*, 1990, 26: 2637—2642.
- [39] Croke J, Wallbrink P, Fogarty P, Hairsine P, Mockler S, McCormack B and Brophy J. Managing sediment sources and movement in forests: The forest industry and water quality. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1999, Industry Report 99/11, 38.
- [40] Hopmans P, Bren L J. Water quality and sediment transport of radiata pine plantation and eucalypt forest catchments in Victoria. In: J Croke and P Lane eds. *Forest Management for Water Quality and Quantity, Proceedings of the Second Forest Erosion Workshop*. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Report 99/6, May 1999. 43—44.
- [41] Kreutzweiser D P, Capell S S. Fine sediment deposition in streams after selective forest harvesting without riparian buffers. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31: 2134—2142.
- [42] Soil and water conservation experiment laboratory in Xifeng of Yellow River. Report on the small watershed research in the Ziwuling forest area. In: the selection of researches on soil and water conservation in Yellow River watershed, 1964.
- [43] Ma X H. Effects of forest harvesting on the stream flow and sediments in the upper research of Minjiang River. *Chinese Resources Science*, 1980. (3): 78—89.
- [44] Xu J Y. Effects of human activities on the stream flow. *Chinese Engineering Hydrology and Hydraulic Calculation*, 1981, (13): 20—23.
- [45] Hou X L, Du C X. Analysis of runoff sediment of Different vegetation plot. *Chinese Soil and Water Conservation Bulletin*, 1985, 5, (6): 35—37.
- [46] Liu Y H, *et al.* Effect of forests on the rainfall distribution and surface runoff. Forestry research paper selection of Inner Mongoulia. Huhehaote Province: Inner Mongoulia Publishinghouse, 1997.
- [47] Liu X D, Wu Q X, Su N H, *et al.* Benefits of water conservation forests of Liupanshan mountain. Scientific exploretation for Liupanshan Mountain Natural Reserve area. Yingchuan: Ningxia Publishinghouse, 1989. 295—339.
- [48] Hewlett J D. Forests and floods in light of recent investigation. *Canadian Hydrology Symposium* 82. Associate Committee on Hydrology, 1982, Ottawa, Ontario, Canada, 543—559.
- [49] Bond B J, J A Jones, G Moore, N Phillips, D Post and J J McDonnell. The zone of vegetation influence on baseflow revealed by diel patterns of streamflow and vegetation water use in a headwater basin. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 1671—1677.
- [50] Bren L J. Effects of slope vegetation removal on the diurnal variations of a small mountain stream. *Water Resources Research*, 1997, 33: 321—331.
- [51] Scott D F. Managing riparian zone vegetation to sustain streamflow: results of paired catchment experiments in South Africa. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29: 1149—1157.
- [52] Dillaha T A, Reneau R B, Mostaghimi S, *et al.* Vegetative Filter Strips for Agricultural Nonpoint Source Pollution Control. *Transactions of the ASAE*, 1989, (32): 513—519.
- [53] Cooper J R, Gilliam J W. Phosphorus redistribution from cultivated fields into riparian areas. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1600—1604.
- [54] Lowrance R, Sharpe J K, Sheridan J M. Long-term sediment deposition in the riparian zone of a coastal plain watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1986, 41: 266—271.
- [55] Sheridan J M, Lowrance R, Bosch D D. Management effects on runoff and sediment transport in riparian forest buffers. *Trans ASAE*, 1999, 42 (1): 55—64.
- [56] Pearce R A, *et al.* Efficiency of grass buffer strips and vegetation height on sediment filtration in laboratory rainfall simulation. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 139—144.
- [57] Lowrance R R, R L Todd, L E Asmussen. Nutrient cycling in an agricultural watershed I. phreatic movement. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13: 22—27.
- [58] Pinkowski R H, *et al.* Effect of feedlot runoff on a southern illinois forested watershed. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14: 47—54.
- [59] Lowrance R, R Todd, J Fail, Jr O Hendrickson, Jr R Leonard and L Asmussen. Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds.

Bioscience, 1984, 34:374—377.

- [60] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. *Ecology*, 1984, 65:1466—1475.
- [61] Jordan T E, Correll D L, Weller D E. Nutrient interception by a riparian forest receiving inputs from adjacent croplands. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22:467—473.
- [62] Snyder N J, Mostaghimi S, Berry D F, Reneau R B, Smith E P. Evaluation of a riparian wetland as a naturally occurring decontamination zone. Pages 259—262. In: *Clean Water, Clean Environment-21st Century, Volume III: Practices, Systems, and Adoption. Proceedings of a conference.* Kansas City, Mo. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich. March 5—8, 1995. 318 pages.
- [63] Magette W L, Brinsfield R B, Palmer R E, Wood J D. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32:663—667.
- [64] Beschta R L, Taylor R L. Stream temperature increases and land use in a forested Oregon watershed. *Water Resources Bulletin*, 1988, 24, 19—25.
- [65] Stott T, Marks S. Effects of plantation forest clearfelling on stream temperatures in the Plynlion experimental catchments, mid-Wales. *Hydrology Earth System Science*, 2000, 4, 95—104.
- [66] Swift L W Jr, Messer J B. Forest cuttings raise temperatures of small streams in the southern Appalachians. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26:111—116.
- [67] Kochenderfer J N, Aubertin G M. Effects of management practices on water quality and quantity: Fernow Experimental Forest, West Virginia. In *Proceedings, Municipal Watershed Management Symposium*, 1975. Gen. Tech. Rep. NE—13, USDA, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Broomall, PA, 14—24.
- [68] Brown G W, Swank G W, Rothacher J. Water temperature in the Steamboat drainage. Res. Pap. PNW-119. USDA, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, OR, 17. 1971.
- [69] Stewart T, Comeau N. Stage en milieu de travail. Unpublished Rept., Dept. of Geography, Université de Moncton, NB, Canada, 1996.

参考文献:

- [12] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展. *世界林业研究*, 1998. (6):14~23.
- [19] 于志民, 王礼先主编. 水源涵养林效益研究. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [25] 卢俊培. 海南岛尖峰岭半落叶季雨林生态效应的研究——冠层淋溶. *热带林业科技*, 1986. (1):1~6.
- [26] 潘维伟. 杉木人工林养分循环的研究. *中南林学院学报*, 1983. 3(1):1~17.
- [27] 马雪华. 森林与水质, 见: 中国林学会森林水文与流域治理专业委员会编集, 全国森林水文学术讨论会文集. 北京: 测绘出版社, 1989. 31~35.
- [28] 詹鸿振, 刘传照, 李兆全, 等. 小兴安岭原始红松林的水文效应和水质研究, 见: 全国森林水文学术讨论会文集. 北京: 测绘出版社, 1989. 63~70.
- [29] 冯延文, 冯宗炜, 等. 北京郊外森林小流域的大气降水的水质及其变化过程. *环境科学进展*, 1999. 17(4):112~119.
- [30] 陈步峰, 林明献, 邱坚锐, 等. 热带山地雨林生态系统对降水水质的影响. *林业科学研究*, 1999. 12(4):333~338.
- [31] 谭芳林, 雷瑞德, 王志洁. 锐齿林生态系统对水质影响的研究. *福建林业科技*, 1999. 26, (2):1~5.
- [32] 刘世海, 余新晓. 密云水库集水区刺槐水源保护林水化学性质研究. *水土保持通报*, 2000. 10, (5):13~15.
- [33] 刘世海, 余新晓, 于志明. 密云水库集水区人工油松水源保护林降水化学性质研究. *应用生态学报*, 2001. 12, (5):697~700.
- [34] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 鼎湖山森林地表水水质状况分析. *生态学报*, 2002. 22, (9):1373~1379.
- [35] 陈步峰, 陈勇, 尹光天, 等. 珠江三角洲城市森林植被生态系统水质效应研究. *林业科学研究*, 2004. 17, (4):453~460.
- [42] 黄委会西峰水土保持试验站. 子午岭林区小流域测试成果总结. 黄河流域水土保持科学研究工作会议汇编, 1964.
- [43] 马雪华. 岷江上游森林的采伐对河流流量和泥沙悬移质的影响. *资源科学*, 1980. (3):78~89.
- [44] 许静仪. 人类活动对径流的影响. *工程水文及水利计算*, 1981. (13):20~23.
- [45] 侯喜禄, 杜呈祥. 不同植被类型小区的径流泥沙观测分析. *水土保持通报*, 1985. 5, (6):35~37.
- [46] 刘永宏, 等. 森林对降雨再分配及对地表径流影响的研究. 内蒙古跨世纪青年林业研究文选. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1997.
- [47] 刘向东, 吴钦孝, 苏宁虎, 等. 六盘山水源林的涵养效益. 六盘山自然保护区科学考察. 银川: 宁夏人民出版社, 1989. 295~339.