

森林溪流水质的研究进展

王云琦, 王玉杰

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 从森林水质的研究进展, 影响森林溪流水质的各因子角度介绍了国内外森林溪流水质的研究进展, 从世界各国的研究来看, 森林在对溪流中悬移质泥沙、水温、溶解氧的影响形成了定论, 对溪流中的病原体和各种化学成分的研究取得了一定的成果, 对森林溪流水质的研究成果, 也为人类的生产活动起到了积极的指导作用。

关键词: 森林溪流水质; 泥沙; 水温; 溶解氧; 病原体

中图分类号: S718 512 3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2003)04-0242-05

Evolution of Study on the Forest Stream Water Quality

WANG Yun-qi, WANG Yu-jie

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: From the point of the study on forest water quality and on the water quality factors of the forest stream, the evolution of study on the forest stream water quality is presented. The forestry effects on suspended sediment, temperature and DO has achieved some certain conclusions, on pathogeny and chemical elements also get some progress in world wide. The study also gives an important guidance to human's practice.

Key words: forest stream water quality; sediment; temperature; DO; pathogeny

随着社会的发展, 人口激增压力以及各种产业造成的环境污染日趋严重, 如何保护和维持优质水源, 已成为世界各国保障人民生活水平及其各种产业持续稳定发展的重要课题。因此, 森林在水土保持、水源涵养、改善水质等方面的功能日益受到人们的重视。

1 国内外的研究进展

从本世纪 60 年代中期起, 水文学家、环境学家、森林生态学家就开始了森林对水质水环境影响的研究工作, 尽管这种研究的最初目的是土壤稳定性问题^[1]。这一时期, 美国的 Coweeta 森林生态和水文研究站开始了生态系统矿质循环研究。这对其后的森林水质影响产生了十分重要的影响。在 70 年代, 整地、除草剂以及林火对森林水质的影响是 Coweeta 森林生态和水文研究站主要研究内容之一^[2]。70~80 年代酸雨成为影响河流水质和森林生态系统健康的主要环境问题, 特别是欧洲中部严重的大气污染通过对树叶的直接破坏或引起土壤严重的酸化, 进而导致了森林的严重破坏, 流域森林覆盖率的减少伴随着持续的酸化对流域水文循环产生了极为不利的影响。为了定量评价大气污染对森林流

域水文循环、化学物质转移的影响, 森林水质的研究受到了广泛的重视^[3,4]。随着点源污染和非点源污染引起水质退化成为影响社会经济发展的重大环境问题^[5], 开发不同时间和空间尺度上化学物质运动的模拟模型, 成为目前评价森林水质影响研究的主要任务^[6], 当然, 这离不开合理布设水化学剖面来确定化学物质循环的路径和通道。

我国大约从 50 年代开始关注森林对水质的影响^[7]。在这方面的研究主要集中在森林对河流悬移泥沙含量的影响, 70、80 年代后, 集中在生态系统本身的营养元素循环上。

1.1 森林对溪流水质的作用机理

森林冠层是大气降水携带各种物质进入森林生态系统的第一个作用面, 一方面降水淋洗、淋溶吸附枝叶表面或枝叶组织中的各种物质, 使其在穿透降水中的含量和携带量增加; 另一方面, 由于冠层枝叶的生理吸收、物理吸收和化学反应使其在穿透降水中的含量和携带量减小。对于某一物质而言, 其量的增减与该物质的物理化学特性、冠层的结构特点及其在植物中的存在形态和易溶解性有关。

林地枯枝落叶层是大气降水进入森林生态系统后的第二个作用面, 与林冠层类似, 对随水分携带穿过其间的各种

物质进行着两种相反的过程,即过滤吸附与淋溶,使物质的浓度和携带量发生变化。

林地土壤层是大气降水进入森林生态系统后的最后一个作用面,此后便以径流和形式输出生态系统。一方面径流能溶解携带(淋溶)部分土壤成分使其在输出系统时某些物质含量增加;另一方面,由于森林土壤结构复杂、疏松多孔、成分多样、微生物的分解作用强,使土壤的吸附过滤作用强,造成另一些物质在径流中的低含量。

林地溪流不仅是森林生态系统的一个组成部分直接参与生物小循环,而且和更大的系统如江河、海湾以及城市居民相联系,受生物地球化学循环所制约。例在俄勒冈与华盛顿之间迁移的溯河产卵鱼在上游溪流和河流及下游海湾之间形成了一个十分明显的生物联系。这些鱼利用小的森林溪流产卵,小鱼在这些溪流中生活1~2年,利用它们作为继续向海洋运动完成它们生活周期之前的抚育地^[8]。

森林生态系统水分循环描述了水分在森林生态系统中的运动。水流是连接大气、土壤、植被连续体以及溪流于一起的主要环境因子。大气和地面溪流之间以水作为物质和能量载体的这些水文过程,如土壤的侵蚀、肥料通过森林土壤进入溪流的淋溶作用,都影响森林溪流水质如泥沙悬移含量,水温等^[9]。

森林生态系统养分循环描述森林群落的营养收支,象水分收支或能量收支一样,包括在贮存系统的输入、输出和运动。其形式与水文循环相同。原因是因为水分是穿过森林生态系统的养分的主要运输者。在养分循环中水直接或间接地起了主要作用。养分循环影响溪流水的化学成分、溪流中的溶氧等^[9]。

1.2 对森林溪流水质各因素的研究进展

1.2.1 森林溪流中的泥沙

由于泥沙影响水的利用,特别是生活用水、鱼类生产以及旅游,因此它是决定水质的一个重要因素。泥沙通过一系列过程到达溪流,所有过程都离不开水。水是泥沙的主要搬运者。土壤渗透和转移水的速度及其内部的抵抗侵蚀的能力决定径流和侵蚀的速度。植被不仅通过蒸腾和截持改变水文系统的水分转移,而且能通过枯枝落叶避免降雨对地表土壤的影响。植物根系一旦和土壤结合,则起另一重要作用,有利于稳定土壤,形成生物聚力而有效的防止面蚀和滑坡。气候影响森林流域的侵蚀速度^[9]。

已有的研究表明,森林植被可降低水对土壤的侵蚀,同时可有效地过滤、截留径流中的泥沙,使溪流保持较低的泥沙悬移质含量。例经研究表明,不同的乔木和灌木树种对流经森林地带的水质所起的作用是不同的,流经松林带的水的含沙量能降到原来含沙量的20%,流经榆树林的含沙量能降到15%^[10]。

但在小森林集水区,表面侵蚀、块体侵蚀以及河道冲刷组成了一个复杂的泥沙运移方式。目前对泥沙的运移已有了一些初步的认识。泥沙的运移以悬移质和推移质形式进行,运移的两个阶段间的变化并不明确,并随许多因素而变化。决定泥沙运移的最主要因素有泥沙量、颗粒大小、溪流量、水

文特性以及暴雨和前期降雨间的时间关系。溪流砾石层细沙的沉积无论在时间上还是空间上都是高度变化的^[11-13]。细沙在溪流砾石层的沉积从河床外观上来看是不明显的^[14]。

1.2.2 森林溪流的水温

水温决定为鱼类能提供多少氧。液体的溶气量与其温度成反比。小溪流的温度情况以多种方式决定它对鱼类生产或供水的价值^[9]。温水有利于许多水生细菌的生长,Brett (1965)报道了哥伦比亚河水的温度上升对一种病原菌—柱状粒球黏菌的影响,几乎能引起红大马哈鱼的灭绝^[15]。小森林溪流的主要热源是辐射在溪流表面的太阳能。在小溪流表面,由传导、对流或蒸发引起的热交换很少。(Brown 1969)由于森林的荫蔽作用,致使直射到溪流表面的阳光较少,水温较低^[16]。在俄勒冈州海岸地带的Alsea流域研究中记录了皆伐引起溪流水温的最大变化情况(Brown和Krygier),这个研究采用两种皆伐处理方式。第一个流域Deer,Creek流域(303.15 hm²),分3块皆伐,皆伐面积占流域面积的25%。在常流溪流边缘留15.24~30.48 m宽的缓冲带。第二个流域,Needle Branch流域(70.82 hm²)被完全皆伐。第三个流域,Flynn Creek流域(202.34 hm²)作为对照,未采伐。其中使温度最多可提高10℃,这是水温与采伐关系研究中温度提高的最高记录值。在Deer,Creek流域采伐未造成温度上升,因为缓冲带一直为溪流提供庇荫^[16,17]。

1.2.3 森林溪流的溶解氧(DO)

森林溪流里溶解氧(DO)极大地影响着溪流水生生态系统的特征及生产力。鱼和其它水生有机体都靠这些氧生存、生长和发育。是一个重要的水质因子。一定时间内的溪流量DO含量由水的溶解能力(溶解力),各种过程的耗氧能力(生物化学耗氧量BOD,化学耗氧量COD),以及氧亏缺的补充速率决定^[9]。

水中氧的溶解力,或饱和含氧量由大气压和水温决定。Henry定律指出一定液体的溶气量与这种溶液上的气压成正比。水的溶氧力与水温成反比。森林沿小河道皆伐后,在大多数极端条件下都能使水温由14℃增加到30℃,用Churchill等提出的计算水温影响的经验回归公式得出溶解氧的饱和值由10.26 mg/L降到7.44 mg/L^[9]。

另据前苏联在几公顷的小流域对几百年生的冷杉林、山毛榉天然混交林采用多种方式进行采伐试验研究表明,在皆伐流域最大流量时的BOD含量为未伐区的1.67倍。而群状皆伐流域未看出此变化^[18]。

对海南岛尖峰岭热带山地雨林集水区岩石、土壤及水化学质流含量的检测,雨林集水区降雨、总径流水体COD的加权浓度含量远低于地面水质,参照1988年国家地面水环境质量标准^[12],COD的含量仅为此标准的0.46^[19]。

1.2.4 森林溪流中的病原体

水是病毒有机体传播的媒介。病原体在水中传播的程度取决于水的物理和化学特性以及病原体对这些特性的忍受能力。细菌和其它微生物有机体在未净化水中很常见,它们从包括土壤、植物、热血动物在内的几个来源进入溪流。并不是所有的微生物有机体都是病原体^[9]。

由于森林溪流远离人们居住区, 受到污染较少。病原体含量相对较少。例如一般寄生在热血动物内脏的细菌在冷的、混浊的山地河流中不能长久生存, 但在温暖、静止的河水中则能蔓延。在许多情况下, 非点源病原体与悬移质泥沙移动方式十分相似。由于细菌在传播过程中会死亡, 使得这个过程更为复杂。土壤和河道是病原体的主要贮存地, 然后在一定时间转移。土壤母质是细菌和病毒的一个良好贮存地。在大多数情况下, 一般病原体向溪流和湖泊的移动是在地表径流作用下进行的^[9]。

Stephenson 和 Rychert 仔细测定了牧场溪流的河床, 确定贮存在那里的大肠杆菌量。他们发现在过渡放牧区泥沙中大肠杆菌量高达 760 倍^[20]。Geldrich 等人从美国 26 个州和另外 3 个国家的 8 种未干扰土壤和一个污染地中采集了 251 个样品, 他们发现在未干扰土壤中仅含有少量的粪便气杆菌病原体, 一般每克土中其数量不足 2 个, 而污染地每克土中含有 3 300~49 000 个病原体^[21]。Seidler 在俄勒冈州西部进行了研究, 流域上部是森林, 下部是 78 家分散居住的小农舍, 发现溪流穿过居民区后, 总杆菌量增加了 10 倍。在林地部分大肠杆菌量超过旅游水标准的惟一的一次是在旱季后的第一次大暴雨期间。而在下游惟一一次未超标是在冬季最大径流冲走污染物时。他还测定了水样中沙门氏菌, 发现这些生物体仅在林区水样出现一次, 但却在林区以下地带水样中占 75%~100%^[22]。

1.2.5 森林溪流的化学成分

从未受干扰森林排出的水中可溶性固体含量一般都很低。正是由于这个原因, 森林流域, 作为一种生活水源被高度赞扬。这种水的硬度一般较低, 并很少需要处理。去掉了有害离子或化合物。

对海南岛尖峰岭热带山地雨林集水区岩石、土壤及水化学质流含量的检测, 雨林集水区降雨、总径流水体 COD、 NH_4^{+} -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、 NH_4^{+} -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、 NH_4^{+} -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^[19]。

我国台湾省对台北市不同地类径流的水质指标研究结果表明, 林地径流中水的生化需氧量、悬浮物、总氮量和总磷量的质量浓度分别为 0.4、6.8、0.24 和 0.01 mg/L, 远小于草地、茶园和果园径流中的水^[23]。

国外一些地区为了防止农业径流中阿特拉津和硝酸盐对河流和地下水的污染, 沿河栽种杨树, 使地表水的硝酸盐含量由 50~100 mg/L 减少到 5 mg/L, 并使 10%~20% 的阿特拉津被树吸收^[24]。

我国通过研究发现: 沿海地区的红树植物, 对污水中的营养物质 N 和 P, 以及某些有毒害的金属元素如 Hg、Cd、

Cu、Zn、Pb、As 均有一定的吸收作用; 在林下土壤中, 沉积有较多形成不溶性络合物的重金属^[24]。

美国俄勒冈州立大学在新罕布什尔的 Hubbard 河的实验林完成的大面积养分释放影响最初研究表明, 砍伐后第一年硝酸根含量比未处理的流域高 41 倍, 第二年高 56 倍。其它阳离子中, Ca^{2+} 增加 4.2 倍, Mg^{2+} 增加 4.1 倍, K^{+} 增加 15.6 倍, Na^{+} 增加 1.8 倍^[25]。

从森林流出的水含有多种化学成分, 由于大气降水在经过森林流域时, 一方面可以使土壤岩石风化物及生物遗体上的各种有机物溶解, 从而增加水中化学成分, 其含有成分及数量随着林种、土壤、地质不同而有差异; 另一方面, 降水通过森林流域变成溪流时, 又可能除去某些溶解成分, 下渗水中某些成分也可能被土壤吸收或通过交换而除去。另外, 雨水可以冲刷掉植物表面的物质, 并将叶被上的许多矿物质养分淋入土壤, 使这些物质迅速在生态系统中循环^[30]。

日本在滋贺县花岗岩地区赤松流域 (6 hm²) 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, 也能除去某原有的溶解成分^[18]。

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 $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{p} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn}$ 。大气降水在经过三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^[26, 27]。

据在秦岭辛家山锐齿栎林生态系统对水质的影响进行了探讨, 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中; 尽管 Pb 在穿透降水中的浓度有所提高, 但携带量却有所减少。林冠层对这 4 种重金属元素均表现为吸附作用。穿透降水穿过枯枝落叶层时, 枯穿水中 Pb 的浓度进一步升高, 其它 3 种重金属元素 (Zn、Cu、Cd) 的浓度再一次降低, 4 种重金属元素的携带量均降低。经过土壤层并以径流输出时, 其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 值变化如表 1。

表 1 系统各个层次水体的 pH 值

系统各种水体	大气降水	穿透降水	枯穿水	径流水	国家标准
pH	6.51	6.57	6.54	7.29	6.5

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, 为 7.29^[28]。

化学物质使用到森林环境中将对森林生态系统产生一

些影响。这些影响通过它们作用于复杂生态系统中一个或多个成分完成的。在这个过程中,这些化学物质影响环境,包括土壤、大气、水、植物以及动物生活。有几种生物和化学过程转化这种化合物或引起使用的化学物质从生态系统和一部分运动到另一部分,这是一个相互作用的过程,并受化学物质的物理化学特性及其进入的环境影响。这些生物化学过程包括降解、挥发、吸收和物理转移,这些过程一般是在水的作用下完成的^[9]。

前苏联在莫斯科和高尔基省的联合集水区,进行了森林净化径流作用的研究,表明,在农田集水区下游的森林有助于从本质上净化水质,滞留效果最好的是磷肥的残余物,为进入农田数量的38.5%~80%,其次是氮的化合物(22%~78%),硝酸盐氮不能被森林土壤所滞留。研究还表明,只要林分面积占大田面积的0.6%~5.3%,就可完全净化径流中的磷^[19]。

2 对人类活动的指导意义

2.1 合理的采伐方式

例可以通过控制沿河岸的植被或覆盖来控制小溪流水温。控制量取决于水质标准和受影响的水生生态系统的自然特征。在许多情况下,水质标准不允许水温变化,所以保留沿河岸的原有植被,或尽量保留原有树木带。从而使饱和溶氧达到较高水平。同样,缓冲带可以防止细的采伐剩余物进入河道,而使耗氧量达到最低水平。但在某些情况下,不适合,例向南流动的河流在东西边留缓冲带效果不大。

一般来说,采伐和更新仅对森林溪流水质产生一点威胁。可是短轮伐期和森林集约经营将产生巨大的养分流失,特别是土层较前浅,交换能力差的地区。为了保持土地生产力,在这些森林经营中有必要进行林地施肥。

2.2 合理使用营林化学物质

化学物质进入水生生态环境的最重要的作用过程是直接喷洒时以喷洒颗粒直接进入水面。研究表明,使处理区远离溪流可以减少喷洒物直接进入水面。认真选取化学物质、喷洒设备以及使用条件都可以减少漂移量。

由于现在使用的大量化学物质都是在差异很大的各种环境下进行的。因此不可能凭借经验确定各种环境下各种化学物质的特征和毒性。但对几种常用营林化学物质对非目标有机体的影响和污染的可能性的基本知识进行了大量的研究。例如,研究表明如果某一条溪流突然被2,4,5-TBE脂污染,在其含量少0.1 mg/kg时将不会影响硬头鲈鱼,而在1 mg/kg时才能引起一些鱼死亡,在10 mg/kg时出现大量死亡。另一方面,蚤状水蚤和小龙虾甚至在更高含量时也不会受到影响^[9]。

研究经验和历史表明:当使用适当时,主要的森林化学物质仅对水生环境产生最小的污染可能。适当使用的关键是对化学物质进入溪流的作用过程的了解以及对影响这

些作用过程作用程度的因素的评价。在使用化学物质时要慎重^[9]。

2.3 合理的旅游和放牧

旅游的影响不如农业、放牧,如果控制人类利用的强度和地点,由旅游引起的污染是可以控制的。旅游的影响由旅游利用强度、垃圾是否处理、旅游离水系的位置以及对这3个因素控制的多少决定。日益增长的一个问题是包括流域区在内的未净化生活供水系统和贮存生活供水水库的旅游利用。

用各种方法控制山地利用程度、放牧量以及避免直接产生溪流污染的放牧地点。围栏、规划引水地以及放牧技术都用来控制放牧。Skinner等人报道在一轻度放牧流域中大肠杆菌量保持在一可接受的范围内^[29]。

2.4 合理的土地利用开发

随着人口的增长和财富的增加,人类一直从城市向郊区迁移。迁移进入森林边缘区,林地成为发展基地,在这些地方居住,如果不考虑土壤类型、排水沟位置以及发展密度,将产生严重的溪流污染。另外,利用森林净化水质的作用,合理规划集水区坡地水源防护林,从而有效防止农田、果园径流排水中营养元素的流失对水库、湖泊造成的富营养化污染,保护水源水质。

3 研究展望

目前人类对水资源的开发和利用提出了更高的要求,而水质是水资源能否得到有效利用的一个前提条件,森林是陆地生态系统的一个重要组成部分,森林环境中的水分直接参与水分的小循环,对水分的大循环产生着种种的影响,森林在改善水质方面的功能也越来越被人们重视,因此对森林溪流水质的研究必将向纵深发展。但森林净化水质,防止非点源污染在研究仍处于试验性阶段,许多问题未能形成定论,特别是对森林水质中化学因子、生物因子的研究,我国在这方面的研究主要集中于森林生态系统本身的养分循环,侧重于大气降水在森林生态系统对养分的输入、输出所起的作用及其意义方面的研究,在其它方面的研究仍是薄弱环节。根据国家需求,今后对该领域的研究将加以深入。一方面虽然对森林影响溪流水质的机理作了很多工作,但森林对溪流水质的作用过程是一个复杂的动态过程,目前对这一动态过程的研究还有很大的空缺,将是一项大的研究项目。森林对溪流水质各化学因子的影响还需要通过大量的实验取得进一步的成果。另一方面,对森林防止非点源污染和溪流水质监测的研究有待于进一步发展,要求通过环境地学、环境水文学和水土保持学等多学科综合分析,较准确掌握区域非点源污染物流失总量,反映不同土地利用类型和地貌类型污染物流失强度以及主要影响因素。由此提出相应对策,在非点源污染控制和保护农村生态环境、发展农村经济方面具有较强的现实意义和应用价值。

参考文献:

- [1] McCulloch J G, Robinson M. History of forest hydrology[J]. J. Hydrol. 1993, 150: 189- 216

- [2] Swank W T and Crossley D A (Editors). Forest hydrology and Ecology at Coweeta[M]. Springer-Verlag, New York, 1988
- [3] Brechtel H M. Monitoring wet deposition in forests: qualitative aspects[R]. Report No. 21 in the Air Pollution Report Series of the Environmental Research Programme of the Commission of the European Communities, Brussels, 1989, 39 - 63
- [4] Brechtel H M, Fuher H W. Importance of forest hydrological "benchmark-catchments" in connection with the forest decline problem in Europe[J]. Agr. For. Meteor., 1994, 72: 81- 89
- [5] Sun G. Application of GIS and modeling into non-point pollution management[A]. 山区可持续发展[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997. 77- 86
- [6] Bassett R L. Chemical modeling on the bare rock or forested watershed scale[J]. Hydrol. Process, 1997, 11: 695- 717
- [7] 马雪华. 森林与水质[A]. 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[C]. 北京: 测绘出版社, 1989. 31- 35
- [8] Harr, R Dennis. Hydrology of small forest streams in western Oregon[R]. USDA For. Serv. Pac. Northwest For. And Range Exp. Sta., Gen. Tech. Rept. 1976 PNW - 55. 15
- [9] George, W. Brown. 森林与水质[M]. 李昌哲, 张理红译. 北京: 中国林业出版社, 1994
- [10] 马雪华. 森林与水[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986
- [11] Beschta, Robert L. Long-term Patterns of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range[J]. Water Resources Res., 1978, 14 (6): 1 011- 1 016
- [12] William L Jackson. The intrusion of fine sediment into a stable gravel bed[J]. Jour. Fisheries Res. Board of Canada, 1979, 36 (2): 204- 210
- [13] Einstein, H. A. Deposition of suspended particles in a gravel bed[J]. Amer. Soc. Civ. Eng., J. Hyd. Div., 1966, 94 (H45): 1 197- 1 205
- [14] Adams, James N. Variation in gravel bed composition of small streams in the Oregon Coast Range[D]. Corvallis: Oregon State Univ. 1980. 160
- [15] Brett, J R. Some principles in the thermal requirements of fishes[J]. Quart. Rev. Biol., 1956, 31: 75- 81
- [16] Brown, G W. Predicting temperatures on small streams[J]. Water Resources Research, 1969, 5(1): 68- 75
- [17] J T Krygier. Effects of clearcutting on stream temperature[J]. Water Resources Research, 1970, 6(4): 1 133- 1 140
- [18] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998(6): 14- 23
- [19] 陈步峰, 林明猷, 邱坚锐, 等. 热带山地雨林生态系统对降雨水质的影响[J]. 林业科学研究, 1999, 12(4): 333- 338
- [20] Stephenson, G R, R C Rychert. Bottom sediment: a reservoir of Escherichia coli in rangeland streams[J]. Jour. Range Management, 1982, 35(1): 119- 123
- [21] Geldrich, E E, C B Huff, R H Border, et al. The fecal coliform aerogenes flora of soils from various geographical areas[J]. Jour. Applied Bacteriology, 1962, 25(1): 87- 93
- [22] Seidler, R J. Point and non-point pollution influencing water quality in a rural housing community [R]. Water Resources Research Inst. Report WRR 1- 64. Oregon State University, Corvallis. 1979. 76
- [23] 张志达, 李世东, 陈英发. 林业生态工程建设与水资源开发利用[J]. 防护林科技, 2000, 42 (1): 31- 356
- [24] 秦钟, 周兆德. 森林与水资源的可持续利用[J]. 热带农业科学, 2001(3): 49- 55
- [25] Likens, G E, F H Bormann, N M Johnson. Nitrification: Importance to nutrient losses from a cutover forest cutting herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard brook watershed ecosystem [J]. Ecological Monographs, 1970, 40 (1): 24- 47.
- [26] 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[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 697- 700
- [27] 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[J]. 水土保持通报, 2000, 10(5): 13- 15
- [28] 谭芳林, 雷瑞德, 王志洁. 锐齿林生态系统对水质影响的研究[J]. 福建林业科技, 1999, 26 (2): 1- 5
- [29] Skinner, Q D, J C Adams, P A Richard. Influences of summer use of a mountain watershed on bacterial water quality [A]. In: A Age of Changing Priorities for Land and Water[C]. Irrigation and Drainage Division Specialty Conference, Spokane, Wash., ASCE, 1972. 57- 78
- [30] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993