

DOI: 10.5846/stxb201304240792

张淑兰, 于澎涛, 张海军, 王彦辉, 贺亮亮, 李振华. 泾河流域上游土石山区和黄土区森林覆盖率变化的水文影响模拟. 生态学报, 2015, 35(4): 1068-1078.

Zhang S L, Yu P T, Zhang H J, Wang Y H, He L L, Li Z H. A simulation study on the hydrological impacts of varying forest cover in the stony mountain area and loess area of the upper reaches of Jinghe Basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1068-1078.

泾河流域上游土石山区和黄土区森林覆盖率变化的水文影响模拟

张淑兰^{1,*}, 于澎涛², 张海军¹, 王彦辉², 贺亮亮², 李振华²

1 佳木斯大学, 佳木斯 154007

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

摘要: 泾河流域上游是黄土高原的重要水源地和退耕还林工程区, 在较大空间尺度上定量评价区内森林覆盖增加的水文影响对科学指导林业生态环境建设、保障区域水安全和可持续发展均有重要意义。为了在尽量排除地形、土壤、气候等作用的基础上定量评价森林的影响, 将泾河上游划分为土石山区和黄土区, 分别制定了多种森林恢复情景, 利用分布式流域生态水文模型 (SWIM) 模拟评价了森林覆盖率及其空间分布变化对流域年蒸散量、年产流量、年地下水补给量、年土壤深层渗漏量及日径流洪峰的影响。土石山区模拟结果表明, 增加森林覆盖将增加流域蒸散和减少流域产流, 如现有森林覆盖 (占全流域面积比例为 13.8%) 情景与现有森林变为草地 (占全流域面积比例为 0) 情景相比时, 流域年蒸散量从 445.4 mm 变为 427.7 mm (减少了 17.4 mm 和 4%); 年产流量从 42.4 mm 变为 53.5 mm (增加了 11.1 mm 和 26.3%), 年地下水补给量从 61.6 mm 变为 76.9 mm (增加了 15.3 mm 和 24.8%), 年深层渗漏量从 72.9 mm 变为 88.3 mm (增加了 17.7 mm 和 24.3%); 平均森林覆盖率每增加 10%, 导致流域年蒸散量增加 12.8 mm, 年产流量减少 8.0 mm, 年地下水补给量减少 11.1 mm。在比较干旱和土层深厚的黄土区, 增加森林覆盖将同样增大流域蒸散和减少流域产流, 但变化幅度明显小于降水相对丰富和土层浅薄的土石山区, 平均森林面积增加 10% 导致流域年蒸散量增加 9.0 mm, 年产流量减少 4.5 mm, 年地下水补给量减少 8.8 mm; 此外, 在较缓坡面造林的水文影响大于较陡坡面造林。从森林水文影响的年内变化来看时, 森林覆盖率升高的水文影响在土石山区和黄土区也有差别, 如土石山区 5—7 月份的蒸散显著增加, 5—10 月份的深层渗漏均有减少; 而黄土区是蒸散量在 5—10 月均有增加, 深层渗漏在 7—10 月份显著减少。另外, 土石山区森林覆盖率增加对日径流峰值的影响不显著, 而黄土区则能明显削弱, 这可能主要是因土石山区的高石砾含量土壤的渗透性能明显高于黄土区的黄土, 而黄土区的森林能够明显改善土壤入渗性能和减少地面径流形成。

关键词: 植被恢复; 森林覆盖率; 水文影响; 蒸散; 径流; 宁夏六盘山; 泾河流域

A simulation study on the hydrological impacts of varying forest cover in the stony mountain area and loess area of the upper reaches of Jinghe Basin

ZHANG Shulan^{1,*}, YU Pengtao², ZHANG Haijun¹, WANG Yanhui², HE Liangliang², LI Zhenhua²

1 Jiamusi University, Heilongjiang, Jiamusi 154007, China

2 The Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: The upper reach of Jinghe Basin is one of the main water-head areas and key afforestation areas in the Loess Plateau of China. A relatively large scaled evaluation of the forest hydrological impacts in this region is important for guiding the rational ecological afforestation, ensuring the regional water supply safety and sustainable development. In order to

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目 (200904056); 国家自然科学基金项目 (41230852, 41071023); 国家林业局宁夏六盘山森林定位站资助

收稿日期: 2013-04-24; 网络出版日期: 2014-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangshulan1980@163.com

possibly remove the disturbances from topography, soil and climate, the upper reach of Jinghe Basin was divided into the stony mountain area and the loess area, and several scenarios were set up in each area. The distributed and eco-hydrological watershed model of SWIM was calibrated and validated by using the meteorological and hydrological data measured in 1997—1999 and 2000—2003 respectively, and then was used to simulate the impacts of varying forest cover and its spatial distribution on the annual evapotranspiration, water yield, groundwater recharge, deep soil percolation, and the peak daily runoff. The simulated results in the stony mountain area showed that increasing forest cover will increase the basin evapotranspiration and reduce the water yield. For example, when compared the current forest/vegetation scenario (13.8% of the whole basin) with the scenario of changing all forests into grassland (0% of the whole basin), the basin annual evapotranspiration is changed from 445.4 mm to 427.7 mm (a decrease of 17.4 mm and 4%), the annual water yield is changed from 42.4 mm to 53.5 mm (an increase of 11.1 mm and 26.3%), the annual groundwater recharge is changed from 61.6 mm to 76.9 mm (an increase of 15.3 mm and 24.8%), the deep soil percolation is changed from 72.9 mm to 88.3 mm (an increase of 17.7 mm and 24.3%). In average, an increase of forest cover of 10% will lead to an increase of basin annual evapotranspiration of 12.8 mm, a reduction of annual water yield of 8.0 mm, and a reduction of annual groundwater recharge of 11.1 mm in the stony mountain area. In the relatively dryer loess region with deep soil, the forest cover increase will also increase the basin evapotranspiration and decrease the water yield, but in an obviously smaller variation range compared with the stony mountain area where the annual precipitation is higher and the soil layer is thinner. In average, the basin annual evapotranspiration is increased by 9.0 mm, the annual water yield is decreased by 4.5 mm, and the annual groundwater recharge is reduced by 8.8 mm, when the basin forest cover is increased by 10%. In addition, the hydrological impacts caused by afforestation on more gentle slopes are stronger than those caused by afforestation on steeper slopes. When comparing the monthly distribution pattern of forest hydrological impacts, there is also a clear difference between the stony mountain area and the loess area. For example, the significant increase of evapotranspiration is found in the period from May to July, and the decrease of deep soil percolation is found in the period from May to October in the stony mountain area; while in the loess area it is in the periods of May-October and July-October respectively. In addition, the impact of varying forest cover on the peak daily runoff is not significant in the stony mountain area, probably because of the high infiltration ability of the soil with high stone fragment content; but significant (decrease) in the loess area, probably mainly because of the obviously increased rainwater infiltration into soil after afforestation and then the reduced surface runoff generation.

Key Words: vegetation restoration; forest cover; hydrological impacts; evapotranspiration; runoff; Liupan Mountains in Ningxia; Jinghe Basin

森林植被恢复与造林是改善区域生态环境的有效措施,特别是在防止水土流失方面。泾河流域是黄土高原水土流失较为严重的地区之一,几十年来的封山育林、植树造林、修筑梯田等措施,使该区在生态环境治理上取得了一定成效,但随之也出现了流域径流的显著减少^[1],其重要原因是植被恢复等治理措施对冠层截留、土壤入渗、地表蒸发、植被蒸腾、坡面产流等水文过程的影响和由此导致的产流量及其空间分布的变化^[2-5]。植被增加导致的径流减少可能是造成干旱缺水地区水资源短缺加剧的一个主要原因^[6]。因此,如何在考虑区域水安全的角度合理地规划造林活动和指导森林经营管理,对区域水安全保障和可持续发展具有重要作用。

在作为黄土高原重要水源地之一的泾河流域上游,从 20 世纪 70 年代起一直都在努力进行森林植被恢复,尤其造林活动。近些年来,该区已进行了较多的森林水文影响研究,如植被冠层截持^[7-9]、枯落物和土壤的蓄水性能及渗透性^[10-11],典型森林植被耗水特点^[12-13]、不同立地的造林径流影响^[14-15]等。这些研究大多集中在样地、坡面或小流域尺度,而在中、大尺度流域或区域的研究还较少。受尺度效应限制,在样地、坡面、小流域不同尺度间存在着较大的研究结果差别,它们也都很难被推广到中、大尺度流域或区域范围。事实上,作

为区域可持续发展和水资源管理决策的依据,对植被变化在中、大流域或区域尺度的径流影响的定量评价具有比小尺度研究结果更加重要的意义。为此,本文采用具有较好数学物理机制基础的分布式流域生态水文模型 SWIM (Soil Water Integrated Model),在泾河流域上游的土石山区和黄土区,考虑地形、植被、土壤、降水等水文要素的时空异质性,设定了森林植被恢复和造林活动的多种情景,开展了水文过程和流域产流的响应模拟,从而定量评价了泾河上游森林植被的水文影响,旨在为该区的森林植被恢复、造林活动及水资源综合管理提供科学依据。

1 研究区概况

泾河流域是西北黄土高原水土流失较为严重的地区之一,其上游位于流域的西南部,具体位置在泾川测站以上($106^{\circ}11'—107^{\circ}21'E$, $35^{\circ}15'—35^{\circ}45'N$),面积为 3164 km^2 ,海拔范围在 $1026—2922\text{ m}$ 。研究区主要有两个大的地貌区:土石山区和黄土区。其中土石山区在海拔 1750 m 以上,由六盘山及其余脉崆峒山和太统山等组成;黄土区海拔位于 $1026—1750\text{ m}$ 之间,主要由丘陵、塬、梁、峁及河川等地貌类型所构成。泾河上游具有半湿润和半干旱的气候,降水多集中于夏季,6—9 月份降水量占全年的 71.2% ,其中土石山区降水量较高,年均降水量 614 mm ,年均气温为 6.5°C 年,总蒸发量为 1419.9 mm ,为半湿润区;黄土区年均降水量 475 mm ,年均气温为 8.8°C ,年蒸发量为 1438.4 mm ,为半干旱区。土壤以灰褐土(土石山区)和黄土(黄土高原)为主。森林主要分布在土石山区,大部分为天然次生林,主要树种包括红桦(*Betula albo-sinensis*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、华山松(*Pinus armandi*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等,少部分为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林;农田占黄土区较大面积,分布于川地、塬地及丘陵,以种植冬小麦(*Triticum aestivum*)为主,玉米(*Zea mays*)次之;草地在两个分区均有覆盖,在土石山区覆盖度较高,为 $50\%—70\%$;在黄土区较低,在 $40\%—50\%$ 之间。

2 研究方法

2.1 模型的构建与验证

SWIM 模型是 20 世纪 90 年代后由 Valentina Krysanova 将 MATSALU 与 SWAT 模型整合改进后而开发的,主要用于评价气候和土地利用变化对流域水文情况的影响,包括流域蒸散、径流、地下水补给、深层渗漏等水文过程,具体的模型结构及计算可参见苏步达等^[16]编译的 SWIM 使用指南。

利用泾河上游的实测气象、植被、土壤、水文等数据,对模型参数进行了率定和检验。

2.1.1 数据准备

(1) 水文、气象数据

选用泾河上游 4 个气象站、17 个雨量站和 1 个水文站(泾川测站)1997—2003 年间的日气象数据,包括日降水、日最高温度、日最低温度、日平均温度、日太阳总辐射、日相对湿度及日径流数据。

(2) 空间数据

利用 DEM(分辨率为 90 m)、土地利用、土壤类型等数据。其中,利用 DEM 将流域划分为 74 个子流域和 677 个水文单元,并提取流域河网和有关流域水文参数。土地利用图来源于 2000 年 5 月和 10 月的 TM 遥感影像数据(分辨率为 30 m)。根据研究区特点将植被划分为 17 种覆盖类型。土壤类型数据根据土地利用类型给出。

(3) 植被数据

主要是叶面积指数和主根系的分布深度,可通过野外调查和参考相关文献获得。其它相关植被参数的取值(如收获指数、生长最适温度等)主要利用 SWIM 模型自带的土地植被数据库中的参数值确定。

(4) 土壤数据

主要是针对各个植被类型进行的赋值和率定,即有 17 种土壤类型及配套的各土层土壤属性值。土壤属

性值主要是土壤深度、容重、有效田间持水量和饱和导水率。本文主要参考《平凉土壤》和时忠杰对六盘山香水河小流域森林植被及土壤的调查结果^[17],其中饱和导水率可利用模型的土壤饱和导水率修正系数做进一步率定而确定。

2.1.2 模型的率定与验证

利用泾川测站的实测径流量来检验和率定模型,其中 1997—1999 年数据用于率定,2000—2003 年数据用于检验。用效率系数(E , Nash-Sutcliffe 系数)(公式 1)和日径流量相对误差(D)(公式 2)对模型率定和验证结果进行评价,其计算公式如下:

$$E = 1 - \frac{\sum_t (Q_{\text{obs}_t} - Q_{\text{sim}_t})^2}{\sum_t (Q_{\text{obs}_t} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (1)$$

$$D = \frac{(Q_{\text{sim}} - Q_{\text{obs}})}{Q_{\text{obs}}} \times 100 \quad (2)$$

式中, Q_{obs} 、 Q_{sim} 、 $\bar{Q}_{\text{obs}}$ 分别为流域径流的实测值、模拟值和实测均值, t 为模拟时间。 E 值越接近于最大值 1 时,模拟精度越高。

2.2 森林植被恢复与造林的情景设定

为便于叙述,本文分别就土石山区、黄土区的森林植被变化进行情景设计,即有 2 组情景,其中各自包括几种可能的情景。

情景组 1:土石山区森林植被变化

在土石山区,森林植被曾遭到严重破坏。到 2000 年为止,该区分布的山杨、红桦、辽东栎等落叶阔叶林均为原有的云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)和华山松等天然林破坏后出现的次生林,并伴有覆盖度较高的灌丛。经过几十年的封山育林,一些次生灌丛和次生草甸为主的阳坡、半阳坡已有成片的华山松林得到恢复;同时,为了尽快使土石山区的森林得到恢复,20 世纪 70 年代以后在该区进行了大量的华北落叶松人工林种植,目前人工林面积约占研究区面积的 3%;此外,尽管该区一直进行荒山荒地造林,但由于土层较薄(<20 cm),造林成活率很低,因此目前的森林覆盖率增加较少。为此,将 2000 年土地利用/覆盖情况作为森林植被恢复后的情景;将整个土石山区某类森林遭破坏后退化为灌丛或草地覆被的情景作为森林植被恢复前的情景,即黄土区保持 2000 年情景而土石山区变为无森林的情景。表 1 给出了森林植被恢复前后可能出现的几种情景。

表 1 泾河上游土石山区森林植被恢复前后情景变化

Table 1 Scenarios before and after forest restored in the stony mountain area of the upper reach of Jinghe

情景代码 Code	情景 Scenario	主要植被占流域面积比 Vegetation cover/%			
		森林 Forests	灌木林 Shrubs	农田 Cropland	草地 Grassland
情景 1 Scenario 1	2000 年土地利用状况	13.8	6.8	5.7	11.7
情景 2 Scenario 2	所有华北落叶松林变草地,其它不变	11.1	6.8	5.7	14.4
情景 3 Scenario 3	所有林地变草地	0.0	6.8	5.7	25.5
情景 4 Scenario 4	所有林地变灌木林	0.0	20.5	5.7	11.7
情景 5 Scenario 5	所有栎林、桦林、山杨林以及华山松、油松和云杉林变为灌木林;华北落叶松林变草地	0.0	17.8	5.7	14.4

情景组 2:黄土区造林

自 20 世纪 70 年代以来,泾河上游黄土区开始重视水土保持植被建设,在一些沟壑和坡面营造了大量刺槐人工林,或恢复了大量草地覆盖,特别是在 1999 后开展了大规模退耕还林。由于森林生长需一个长期过

程,假定 2000 年的土地利用情况为水土保持林还未真正恢复时的情景,即黄土区大规模造林前的情景。同时,利用 GIS 手段通过 DEM 提取地形因子,制定未来退耕还林(刺槐人工林)还草(自然草地)后的植被恢复情景。其具体作法如下:

利用研究区 90 m 的 DEM,根据张晓萍等^[18]对其坡度的分析表明,此 DEM 坡度 0—5°、5°—15°、15°—25° 和 >25° 分别相当于地面实际坡度 0—20°、20°—30°、30°—40° 和 >40°。其中黄土区坡度在 0—5° 的面积占流域的 17.4%,5°—15° 的占 26.6%,>15° 的占 17.1% (其中 >25° 的占 1.5%)。研究表明,当实际坡度 >25° 时已不利于农田耕作,且适宜人工造林的坡度为 25°—45° 之间,因此,本研究以 DEM 坡度 5° 和 15° 为临界值,设计了 6 种刺槐人工林及草地的恢复情景(表 2),其中耕地包括水平梯田和旱塬农田。

3 结果与分析

3.1 模型的率定与验证

对照 1997—1999 年(率定期)和 2000—2003 年(验证期)的流域出口的日径流观测值,用效率系数(E) (Nash-Sutcliffe 系数)和日径流量相对误差进行模型拟合精度的评价。SWIM 模型模拟的泾川测站日径流量与实测值吻合较好(图 1),效率系数 E 值在率定期和验证期分别为 0.51 和 0.55,日径流量平均相对误差分别为 1.6% 和 0.3%,表明率定过的模型能较准确地模拟径流量。

表 2 泾河上游黄土区造林前后情景变化

Table 2 Scenarios before and after forest restored in loess area of the up reach of Jinghe

情景代码 Code	情景 Scenario			主要植被占流域面积比 Vegetation cover/%		
	<5°	5°—15°	>15°	森林 Forests	农田 Cropland	草地 Grassland
2000 年土地利用状况 The situation of land use in 2000	耕地	77% 的耕地	72% 的草地	6.3	36.5	17.8
情景 6 Scenario 6	耕地	刺槐林	刺槐林	44.7	15.9	0.0
情景 7 Scenario 7	耕地	草地	草地	0.0	15.9	44.7
情景 8 Scenario 8	耕地	草地	刺槐林	16.7	15.9	30.0
情景 9 Scenario 9	耕地	刺槐林	草地	30.0	15.9	16.7
情景 10 Scenario 10	耕地	耕地	刺槐林	16.7	43.9	0.0

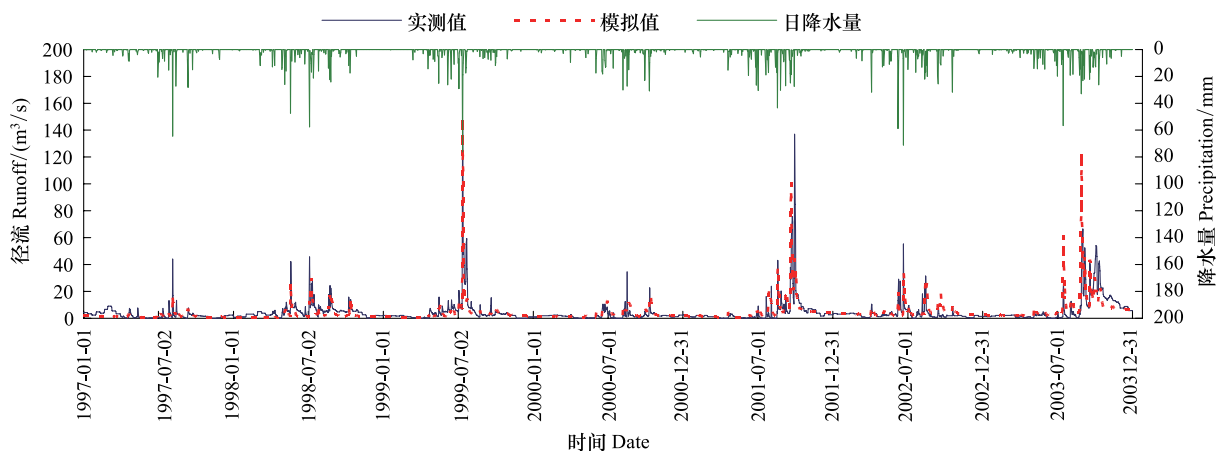


图 1 1997—2003 年 SWIM 模型模拟的泾川站日径流量与实测值比较

Fig.1 Comparison between the observed and simulated runoff by SWIM at Jingchuan station from 1997 to 2003

3.2 土石山区森林的流域水文影响

土石山区森林面积占研究流域面积的 13.8%,这些森林对调节泾河上游水文过程具有重要作用。利用率

定和验证好的 SWIM 对森林植被恢复前后各情景进行了模拟,发现森林植被恢复对该区水文过程变化具有明显作用(表 3)。为了定量估计该区造林对水文过程的影响,特设情景 2 将占研究区 2.7%的人工华北落叶松林变为了草地,结果发现流域年蒸散量减少 0.7%(3.3 mm),流域出口的年产流量则增加 5.6%(2.4 mm),年地下水补给增加 4.4%(2.7 mm),这说明土石山区人工林面积每增加研究区的 10%,则流域的年蒸散量增加 12.2 mm,年产流减少 8.9 mm,年地下水补给减少 10 mm;这样的结果从情景 3 中也同样可看到,将所有现有森林(13.8%)变为草地后,年蒸散量减少 4%(17.7 mm),年产流量增加 26.3%(11.1 mm),年地下水补给增加 24.8%(15.3 mm);对应森林覆盖率每增加 10%,平均导致流域年蒸散量增加 12.8 mm,年产流量减少 8.0 mm,年地下水补给量减少 11.1 mm,年深层渗漏量减少 12.8 mm,可见由草地恢复和营造为森林后会显著减少流域的产流功能。

表 3 土石山区森林植被恢复前的各种情景与现状的流域水文变化对比(1997—2003 年)

Table 3 Comparison of hydrological changes between scenarios and current situation in the stony mountain area

情景 Scenario	年蒸散量 AET/mm	年地下水补给量 GWRCH/mm	流域出口年径流量 WYLD/mm	年深层渗漏 PERC/mm
情景 1 Scenario1 (现状 current simulation)	445.4	61.6	42.4	72.9
情景 2 Scenario2	442.1(-0.7%)	64.3(+4.4%)	44.8(+5.6%)	75.6(+3.7%)
情景 3 Scenario3	427.7(-4.0%)	76.9(+24.8%)	53.5(+26.3%)	88.3(+21.1%)
情景 4 Scenario4	441.2(-1.0%)	62.0(+0.7%)	45.8(+8.0%)	73.1(+0.3%)
情景 5 Scenario5	439.0(-1.4%)	64.9(+5.3%)	47.0(+10.9%)	76.1(+4.3%)

AET is actual evapotranspiration; GWRCH is groundwater recharge; WYLD is water yield; PERC is deep percolation

当将土石山区的乔木林(13.8%)全部变为灌木林(情景 4)时,流域水文响应不如变为草地时那样剧烈,如年蒸散量仅减少 1%(4.2 mm),流域出口的年产流量增加 8%(3.4 mm),年地下水补给量增加 0.7%(0.4 mm);情景 5 的水文影响比情景 4 略大些,其年蒸散量减少 1.4%(6.4 mm),年产流量增加 10.9%(4.6 mm),以及年地下水补给量增加 5.3%(3.3 mm),这主要是因该情景将华北落叶松变为草地引起了水文过程较大差异。

植被覆盖情景变化,特别是森林与草地的转换,不仅使流域的蒸散量、产流量和地下水补给量发生显著变化,且流域的年深层渗漏也发生重大变化。从模拟结果看,森林变为草地(情景 3)的年深层渗漏量显著增加 21.1%,而乔木林变为灌木林时(情景 4)仅增加 0.3%。

同时,对水文过程变化显著的情景 3(森林变为草地)和现状进行了月值对比,发现森林转变为草地后,蒸散量的变化主要发生在夏季 5—8 月(图 2),地下水补给量全年均发生了改变,但从 7 月份到翌年的 1 月份变化较为明显(图 3);深层渗漏变化(图 4)主要发生在 5—10 月,但两种情景下深层渗漏差异较显著期均为植被旺盛生长的 7 月份,而不是深层渗漏最大值的 9 月份。从模拟情况看,月降水量分布和植被变化在共同影响蒸散量、地下水补给量和深层渗漏量的变化,如夏、秋季节的地下水补给和深层渗漏由于受植被强烈蒸散耗水和土壤中水分穿透缓慢影响而明显滞后于月降水。

对各种情景模拟的径流峰值进行比较(表 4),发现森林变为草地或灌木林对出口日径流峰值的影响并不显著,其中森林变为草地(情景 3)使得径流峰值增加 4.8%,乔木林变为灌木林(情景 4)使径流峰值增加仅

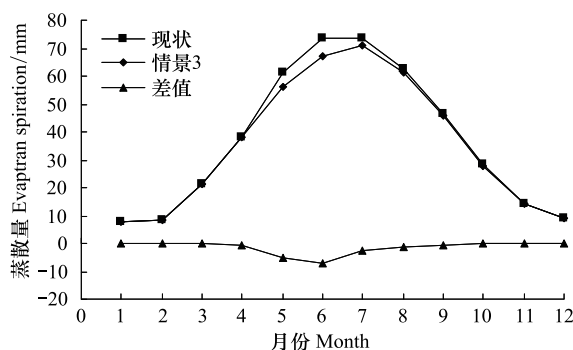


图 2 土石山区植被恢复(现状)与无森林覆盖(情景 3)条件下的月蒸散量比较

Fig.2 Comparison of month evapotranspiration between current vegetation cover and the sinario of no forests in the stony mountain area

1.5%,这说明森林变为草地后地表径流虽有所增加,但从坡地到流域的尺度增大使其调节作用明显弱化,从而使得流域出口径流峰值变化不明显,但总产流量受多个分量(地表径流、壤中流和地下径流)影响而具有显著变化。

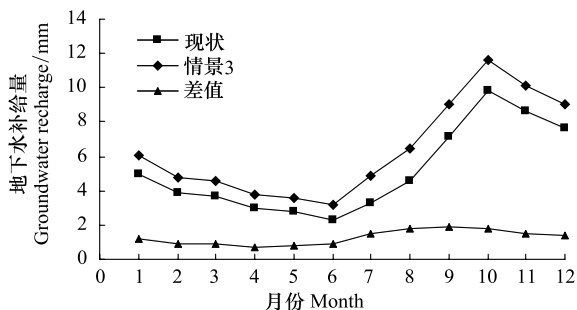


图3 土石山区植被恢复(现状)与无森林植被(情景3)的月地下水补给比较

Fig.3 Comparison of month groundwater recharge between current vegetation cover and the scenario of no forests in the stony mountain area

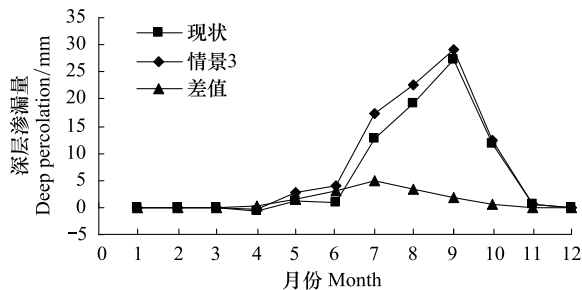


图4 土石山区植被恢复(现状)与无森林植被(情景3)的月深层渗漏量比较

Fig.4 Comparison of month deep percolation between current vegetation cover and the scenario of no forests in the stony mountain area

表4 土石山区森林植被恢复对出口日径流洪峰的影响

Table 4 The influence of forest restoration on outlet peak daily runoff in stony mountain area

洪峰情况 Flood peak situation	现状 Current situation	情景2 Scenario 2	情景3 Scenario 3	情景4 Scenario 4	情景5 Scenario 5
模拟的峰值 * Simulated peak value/(m^3/s)	149.9	150.2	157.1	151.3	151.4
峰值变化量 Variation of peak value/(m^3/s)	0.0	0.3	7.2	1.5	1.5
变化的百分比 Variable percentage/%	0.0	0.21	4.84	0.97	1.01

* 以模拟期间日洪峰流量最大的一天(1999年7月13日)为例

3.3 黄土区造林的流域水文影响

针对考虑坡度因素的造林活动进行了流域水文影响的模拟,结果发现黄土区不同坡度造林及由此形成的不同景观格局(情景6—10)明显改变了流域水文过程(表5)。与现状对比,情景6将DEM坡度 $>5^\circ$ (实际坡度大于 20°)的地方全部造林后,使流域森林覆盖率增加了38.4%,年蒸散量显著增加7.1%(31.8 mm),这引起流域出口的年产流量明显减少36.2%(25.4 mm),年地下水补给量也显著减少51.1%(31.5 mm),由此可见森林覆盖率增加对产流量和地下水补给产生了深刻影响。然而,将DEM坡度 $>5^\circ$ 的地方全部植草(情景7),即黄土区无森林覆盖,流域的年蒸散量减少3.9%(17.5 mm),而年产流量和地下水补给量分别明显增加21%(8.9 mm)和27.4%(16.9 mm)。因此,如果黄土区DEM坡度 $>5^\circ$ (实际坡度 $>20^\circ$)的地方全部造林,会威胁到流域中下游的各业用水安全和可持续发展。为此,需对不同坡度的造林植草情景(情景8—情景10)进行水文影响评价。

表5 黄土区森林植被恢复前的各种情景与现状的流域水文变化对比

Table 5 Comparison of hydrological changes between scenarios and current situation in loess area

情景 Scenario	年蒸散量/mm AET	年地下水补给量/mm GWRCH	流域出口年径流量/mm WYLD	年深层渗漏/mm PERC
现状 Current situation	445.4	61.6	42.4	72.9
情景6 Scenario6	477.2(+7.1%)	30.1(-51.1%)	27.0(-36.2%)	37.0(-49.3%)
情景7 Scenario7	427.9(-3.9%)	78.5(+27.4%)	51.3(+21.0%)	90.2(+23.8%)
情景8 Scenario8	446.6(+0.3%)	60.0(-2.5%)	42.6(+0.4%)	69.9(-4.1%)
情景9 Scenario9	458.6(+3.0%)	48.5(-21.2%)	37.1(-12.4%)	57.3(-21.4%)
情景10 Scenario10	458.8(+3.0%)	48.3(-21.6%)	32.7(-22.9%)	58.3(-20.0%)

情景 8 和情景 9 分别在 DEM 坡度 5° — 15° 和 $>15^{\circ}$ 的坡面造林和植草,其水文影响明显不同,这一方面受不同坡度的坡面面积差别的影响,另一方面是由于森林和草地的水文过程影响及土壤性质改变不同而造成的。情景 8 在 DEM 坡度 5° — 15° 的地方植草,DEM 坡度 $>15^{\circ}$ 的地方造林,其年蒸散量比现状略有增加 (0.3%),而年产流量和地下水补给量均有所减少;情景 9 在 DEM 坡度 5° — 15° 的地方造林,DEM 坡度 $>15^{\circ}$ 的地方植草,使年蒸散量增加 3% (13.2 mm),年产流量和地下水补给量分别明显减少 12.4% (5.3 mm) 和 21.1% (13.1 mm)。情景 10 使耕地面积在黄土区达到了最大化,同时坡度 $>15^{\circ}$ 的地方造林,这使得流域年蒸散比现状增加 3%,并引起年产流量和地下水补给量的分别显著减少 22.9% (9.7 mm) 和 21.6% (13.3 mm)。根据造林和耕地对坡度的要求,当 DEM 坡度 $>15^{\circ}$ (实际坡度 $>30^{\circ}$) 时已不利于农田耕作,且适宜人工造林的坡度为 25° — 45° 之间,情景 9 和情景 10 均符合实际情况,但情景 10 减少产流量是情景 9 的 1.8 倍,这可能是农田蒸散耗水大于草地的原因。

黄土区森林和草地的分布与面积变化除了对流域的年蒸散、产流和地下水补给产生显著的影响外,同样也引起流域年深层渗漏的较大变化。随着森林面积大量增加 (情景 6),年深层渗漏显著减少 49.3% (35.9 mm),而草地面积大量增加 (情景 7) 则使其显著增加 23.8% (17.3 mm)。

同时,从模拟的日径流过程看,该区造林将会显著削减流域的径流洪峰值 (图 5)。

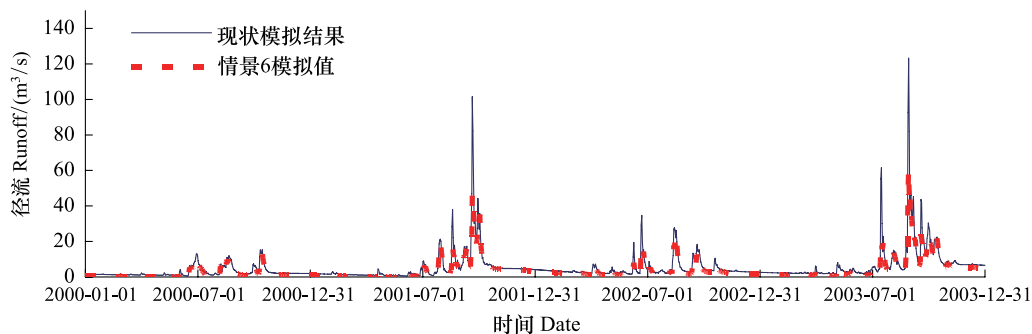


图 5 黄土区造林 (情景 6) 对流域出口径流洪峰的影响

Fig.5 The influence of forestation on outlet peak discharge in loess area

根据各情景模拟结果,对黄土区森林覆盖率 (%) 与流域各水文变量 (蒸散量、径流量和地下水补给量) (mm) 进行回归分析,得到回归方程:

$$y_{(\text{蒸散量})} = 0.8978x + 436.03 \quad (R^2 = 0.867)$$

$$y_{(\text{径流量})} = -0.4538x + 47.491 \quad (R^2 = 0.7481)$$

$$y_{(\text{地下水补给})} = -0.8808x + 70.603 \quad (R^2 = 0.87)$$

$$y_{(\text{深层渗漏})} = -0.9919x + 82.499 \quad (R^2 = 0.8956)$$

由此可见,在黄土区每增加 10% 的森林面积,流域蒸散量将增加 9.0 mm,这引起产流量、地下水补给量和深层渗漏分别减少 4.5、8.8 mm 和 9.9 mm。

为了更深刻地了解黄土区造林的水文影响,同样对该区造林活动的水文影响月变化进行了分析。图 6 可

看出,黄土区造林后 3—4 月份的蒸散量比现状少 2—3 mm,这主要是因现状条件下 3—4 月份春季小麦生长耗水造成的,而造林后 5—9 月份蒸散量显著增加 3.5—9.2 mm;虽然造林后 3—4 月份蒸散量减少,但地下水补给量全年都在减少,且从 7 月份到翌年 1 月份变化较为显著,与土石山区森林恢复情景的水文影响模拟结果相同 (图 7)。从深层渗漏量看 (图 8),造林后 7—10 月份的深层渗漏显著减少,且差值最大值在深层渗漏较大的 9 月份。另外,与土石山区森林变化情景一样,黄土区植被变化并未改变地下水补给和深层渗漏滞后

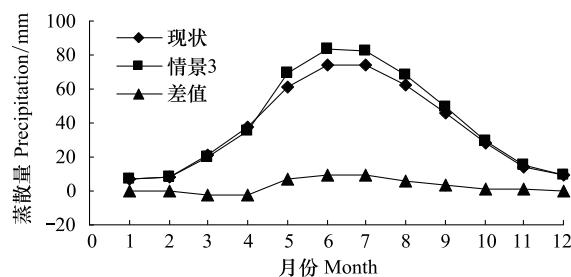


图 6 黄土区造林情景 6 (森林覆盖率为 44.7%) 与现状 (森林覆盖率为 6.3%) 的月蒸散量对比

Fig. 6 Comparison of month evapotranspiration between forestation scenario 6 (forest cover of 44.7%) and current situation (forest cover of 6.3%) in loess area

于月降水的现象。

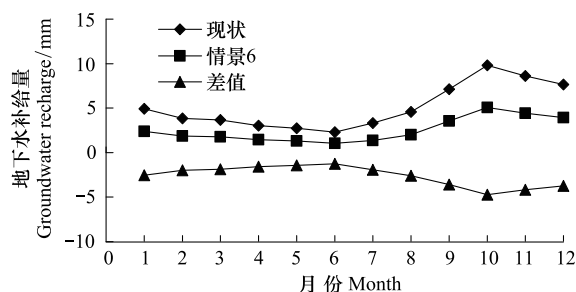


图7 黄土区造林情景6(森林覆盖率44.7%)与现状(森林覆盖率6.3%)的地下水补给量对比

Fig.7 Comparison of month groundwater recharge between forestation scenario 6 (forest cover of 44.7%) and current situation (forest cover of 6.3%) in loess area

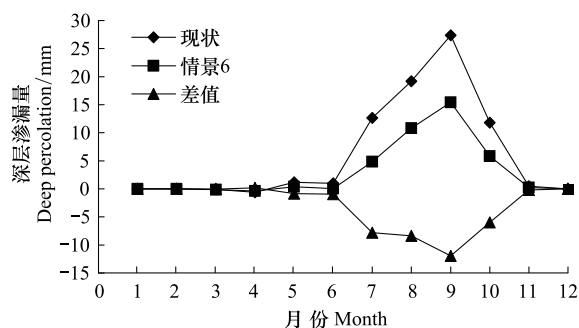


图8 黄土区造林情景6(森林覆盖率44.7%)与现状(森林覆盖率6.3%)的月平均深层渗漏对比

Fig.8 Comparison of month deep percolation between forestation scenario 6 (forest cover of 44.7%) and current situation (forest cover of 6.3%) in loess area

4 讨论

森林植被的恢复和重建一般会使得流域蒸散增加,从而导致径流和地下水补给量减少;然而,受区域气候、植被和土壤等自然因素的影响,造林或植被恢复的水文影响会存在显著的区域差异。从以上研究结果可看出,在泾河上游土石山区,平均森林面积每增加10%,流域的年蒸散量增加12.8 mm,年产量减少8.0 mm,但对日径流洪峰值影响不显著;而黄土区森林面积每增加10%,流域的年蒸散量将增加9.0 mm,年产量减少4.5 mm,并明显削弱了日径流的洪峰值。气候因素特别是降水(土石山区降水量比黄土区多140 mm)可能是导致两个区域造林后流域蒸散量和产流量响应差异较大的主要原因;然而,从日径流洪峰值的变化差异看,森林恢复和造林对两个区域地表产流的影响可能更多还要受到土壤性质的影响。在土石山区,土壤石砾含量较大,无论是森林还是草地,均具有较高的土壤导水率,利于降水入渗,并可能导致大量深层渗漏,从而形成地表径流较少,因此即使发生植被覆盖变化带来的一定的土壤性质改变,但对地表产流的影响不大,使得径流洪峰值改变较小。相反,黄土区土壤导水率较低,农田和草地等土地利用类型容易形成地表径流;当农田和草地转变为森林时,可能由于森林增强土壤入渗等水文作用,使降水容易渗入土壤而显著减少地表径流,因此黄土区造林对日径流洪峰有明显降低作用。

孙阁等^[19]根据平均年降水和温度建立的经验公式,估算黄土高原全部造林后将减少年径流50 mm,即平均造林面积每增加10%,年径流减少5 mm;王彦辉等^[20]根据降水、径流与森林覆盖率的关系得出,在黄土高原,当降水量为500 mm时,造林面积每增加10%,年径流也将减少5 mm;这些研究结果与本文中黄土区造林后(按10%算)年径流减少量(4.5 mm)很接近,但明显低于本文中土石山区造林(10%)后的年径流减少量(8.9 mm)。

同样利用SWIM模型,于澎涛等^[14]在泾河上游土石山区的香水河小流域进行的造林影响径流的模拟研究表明,造林面积每增加流域面积的10%,年径流平均减少15.8 mm,远大于本文研究的泾河上游(泾川测站以上)的中尺度流域模拟得到的结果,即土石山区森林面积每增加流域面积的10%将减少年径流8.9 mm,这个差别可能是受研究流域的面积大小(即模拟空间尺度)和水文要素(气象、植被、土壤、地形)等方面的差异影响。张璐璐等^[21]对黄土高原的有关文献资料结果整理后发现,土地覆被变化对年径流的影响随着流域面积增大而减弱。本文研究的泾河上游流域面积为3164 km²,而香水河小流域仅44 km²。此外,很多研究表明模型重要的输入数据DEM的分辨率会影响流域单元划分和模拟精度,从而造成同一地区不同DEM分辨率下的结果出入较大^[22],如于澎涛等利用的小流域DEM分辨率为10 m,而本研究流域的为90 m。

另外,森林恢复与重建中离不开树种的组成与选择。于澎涛等^[14]对泾河上游六盘山香水河小流域的树种组成变化的水文影响模拟结果表明,华北落叶松、山杨和红桦等主要树种的流域产水量影响差异不大。Martin 等^[23]在德国勃兰登堡(年降水量 500—600 mm)研究的树种变化的水文影响结果表明,欧洲赤松和普通栎林变化的区域水文影响不明显。为此,本文没有涉及森林恢复和重建中的树种组成选择问题。但实际上,不同树种在生长速度、个体大小、LAI 大小、根系形态和生物量大小及深度分布、土壤水文物理性质影响等方面还是有明显差异的,这必然产生一定的水文影响差别,还需进行持久而详细的野外观测与深入研究。

最后,针对研究区特殊的地形地貌,考虑地形因素对植被恢复和造林的影响是必要的,于澎涛等^[14]在泾河上游香水河小流域的研究表明,造林的立地条件差异对造林后的径流减少量具有明显影响。然而,本研究受 DEM 数据分辨率的限制,只考虑了坡度因子,且仅根据坡度变化设置了森林植被变化情景,而没有对坡度、坡向等地形因子在造林引起产流变化中的作用做深入研究。因此,以后将需加强地形因素影响森林水文作用的研究;并考虑尺度上推理论和技术的发展,将样地、坡面、小流域的研究结果转化到中、大流域或区域尺度。

5 结论

利用具有物理机制的分布式水文模型 SWIM,在黄土高原泾河流域的上游,通过区分在气候、土壤、植被、地形等水文要素存在明显差异的土石山区和黄土区,模拟研究和比较了森林覆盖率变化带来的流域水文影响。所得主要结论如下:

(1)与流域均覆盖草地的情景相比,土石山区森林每增加流域面积的 10%,则流域年蒸散量增加 12.8 mm,年产流量减少 8.0 mm,年地下水补给量减少 11.1 mm;而黄土区每增加流域面积 10%的森林,流域的年蒸散量增加 9.0 mm,年产流量减少 4.5 mm,年地下水补给量减少 8.8 mm。在日径流的洪峰值上,增加森林覆盖率的影响在土石山区不显著,但在黄土区则会明显削弱日径流洪峰值。综合来看,土石山区和黄土区的森林水文影响存在很大的差异。

(2)从森林恢复和造林的水文影响的各月变化来看,除地下水补给在全年各月均有减少外,其他水文变量的变化主要发生在主生长季(5—10 月份);其中,蒸散量在土石山区是 5—7 月份增加显著,在黄土区则是在 5—10 月份均有增加;土壤的深层渗漏在土石山区是 5—10 月份均有减少,在黄土区则是 7—10 月份均显著减少。

(3)在黄土区,在 DEM 坡度 5° — 15° (相当于实际坡度 20° — 30°)的地方植草和 DEM 坡度 $>15^{\circ}$ (相当于实际坡度大于 30°)的地方造林,年蒸散量比现状略有增加(0.3%),而年产流量和年地下水补给量均有所减少。但在互换造林和植草的坡度区间后,年蒸散量增加 3%(13.2 mm),年产流量和年地下水补给量明显减少 12.4%(5.3 mm)和 21.1%(13.1 mm),即较缓坡面造林后带来的水文影响大于较陡坡面造林。

参考文献(References):

- [1] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,张海军,刘革非,屠新武. 泾河流域近 50 年来的径流时空变化与驱动力分析. 地理科学, 2011, 31(6): 721-728.
- [2] Osman M, Sauerborn P. Soil and water conservation in Ethiopia. Journal of Soils & Sediments, 2001, 1(2): 117-123.
- [3] Huang M B, Zhang L. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. Hydrological Processes, 2004, 18(10): 1885-1898.
- [4] Sanderson J H, Kotliar N B, Steingraeber D A, Browne C. Simulated natural hydrologic regime of an intermountain play a conservation. Wetlands, 2008, 28(2): 363-377.
- [5] Wang S F, Kang S Z, Zhang L, Li F S. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. Hydrological Processes, 2008, 22(14): 2502-2510.
- [6] Wang Y H, Bonell M, Feger K H, Yu P T, Xiong W, Xu L H. Changing forestry policy by integrating water aspects into forest/vegetation restoration in dryland areas in China. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 26(1): 59-67.
- [7] 时忠杰,王彦辉,于澎涛,熊伟,郭浩,郭明春. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究. 水土保持学报, 2005, 19(3):

134-138.

- [8] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [9] 段旭, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 徐丽宏. 六盘山分水岭沟典型森林植被对大气降雨的再分配规律及其影响因子. 水土保持学报, 2010, 24(5): 120-125.
- [10] 莫非, 于澎涛, 王彦辉, 王晶, 熊伟, 徐丽宏. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程. 生态学报, 2009, 29(6): 2868-2876.
- [11] 窦建德, 王绪芳, 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 郭浩. 宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究. 林业科学研究, 2006, 19(3): 301-306.
- [12] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 沈振西, 郭明春, 管伟, 马长明, 叶兵, 郭浩. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 19-25, 32-32.
- [13] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 时忠杰, 沈振西, 郭明春. 六盘山辽东栎、少脉椴天然次生林夏季蒸散研究. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1628-1632.
- [14] Yu P T, Krysanova V, Wang Y H, Xiong W, Mo F, Shi Y H, Liu H L, Vetter T, Huang S C. Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in northwest China. Geophysical Research Letters, 2009, 36(2), doi: 10.1029/2008GL036744.
- [15] Xu L H, Wang Y H, Yu P T, Shi Z J, Xiong W, Mo F, Zhang S L, Dong X H. Hydrological impacts of afforestation: A case study based on simulation of TOPOG in the small watershed of Caogou in Liupan Mountains, China. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(3): 202-210.
- [16] Krysanova V, Wechsung F, Arnold J. SWIM 模型使用指南. 苏布达, 曹丽格, 翟建青, 译. 北京: 气象出版社, 2011.
- [17] 时忠杰. 六盘山香水河小流域森林植被的坡面生态水文影响 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [18] 张晓萍, 张槽, 李锐, 杨勤科. 基于 DEM 的黄河中游植被恢复对年均径流量影响的估计. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1056-1064.
- [19] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, Wei X H, McNulty S G, Vose J M. Potential water yield reduction due to forestation across China. Journal of Hydrology, 2006, 328: 548-558.
- [20] Wang Y H, Yu P T, Feger K H, Wei X H, Sun G, Bonell M, Xiong W, Zhang S L, Xu L H. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China. Ecohydrology, 2011, 4(2): 277-287.
- [21] Zhang L L, Podlasly C, Ren Y, Feger K H, Wang Y H, Schwärzel K. Separating the effects of changes in land management and climatic conditions on long-term streamflow trends analyzed for a small catchment in the Loess Plateau region, NW China. Hydrological Processes, 2013, doi: 10.1002/hyp.9663.
- [22] 高超, 金高洁. SWIM 水文模型的 DEM 尺度效应. 地理研究, 2012, 31(3): 309-409.
- [23] Wattenbach M, Zebisch M, Hattermann F, Gottschalk P, Goemanne H, Kreinse P, Badecka F, Lascha P, Suckowa F, Wechsunga F. Hydrological impact assessment of afforestation and change in tree-species composition-A regional case study for the Federal State of Brandenburg (Germany). Journal of Hydrology, 2007, 346: 1-17.