

# 黄土高原和六盘山区森林面积增加 对产水量的影响

王彦辉<sup>1</sup>, 于澎涛<sup>1</sup>, 张淑兰<sup>1,2</sup>, 熊伟<sup>1</sup>, 徐丽宏<sup>1</sup>, 左海军<sup>1</sup>, 王晓<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 佳木斯大学, 黑龙江 佳木斯 154007)

**摘要:** [目的] 定量评价黄土高原地区造林对流域产水量的影响, 指导林业协调的林业发展和森林管理。 [方法] 综合分析多年在黄土高原、泾河流域、六盘山区开展的森林产流影响的多尺度研究结果。 [结果] 在黄土高原区域尺度, 林地平均年径流 (16 mm) 比非林地 (39 mm) 减少 59%; 在典型流域尺度 (泾河干流上游流域), 森林年均产水量 (76 mm) 比自然草地减少 51%, 其中, 半湿润土石山区的森林年均产水量 (88.8 mm) 比自然草地减少 58%; 在典型小流域尺度 (半湿润的香水河小流域), 完全覆盖森林后的年均产流比无森林覆盖情景减少 59%。森林增加导致的年产流减幅在干旱地区和干旱年份会更大, 并可能超过 100%, 如年降水量低于 450 mm 的黄土流域、半干旱的泾河上游黄土区的林地及半干旱的叠叠沟小流域的坡面乔木林分样地, 其年产水量常为零或负值, 即需消耗土壤水分和坡上汇入径流等维持生存。低度间伐不能显著减少森林蒸散耗水。 [结论] 在黄土高原研究的小流域、流域和区域空间尺度内, 造林减少年产流量的平均幅度都在 50%~60% 以上, 且随干旱程度的增加可达到 100%, 并因消耗降水外的其他水源而出现负产流。需依据水分承载力合理选择待恢复植被类型和确定森林覆盖率, 这是保障区域供水安全和实现林业协调管理的基本途径。

**关键词:** 黄土高原; 空间尺度; 森林; 流域; 产水量

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)01-0015-12

## Effects of Forest Area Increase on Water Yield on the Loess Plateau and Liupan Mountains Region of Northwest China

WANG Yan-hui<sup>1</sup>, YU Peng-tao<sup>1</sup>, Zhang Shu-lan<sup>1,2</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, XU Li-hong<sup>1</sup>, ZUO Hai-jun<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry; State Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Beijing 100091, China; 2. Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China)

**Abstract:** [Objective] To quantitatively evaluate the effects of afforestation on the water yield of watersheds on the Loess Plateau, and to provide references for integrated forestry development and forest management. [Method] The long-term and multiple-scaled study results about the effects of forest on water yield carried out on the Loess Plateau, Jinghe Watershed and Liupan Mountains region were comprehensively analyzed. [Result] At the regional scale of the Loess Plateau, the mean annual runoff (16 mm) from forestland was reduced by 59% compared with that from non-forestland (39 mm). At the typical watershed scale (the upper stream of Jinghe watershed), the mean annual water yield from forestland (76 mm) was reduced by 51% compared with that from natural grassland, in which the relative reduction in the semi humid mountain area of this watershed was 58% (88.8 mm). At the

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671025、41230852); 宁夏回族自治区项目 (YES-16-12); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501603、2017YFC0504602); 国家林业局宁夏六盘山森林生态站资助

作者简介: 王彦辉 (1957—), 男, 研究员, 博士生导师. 主要研究方向: 森林水文、森林生态、森林土壤、多功能林业. Email: wangyh@caf.ac.cn

typical small watershed scale (the semi humid Xiangshuihe watershed), the mean annual water yield under fully forested scenario was reduced by 59% compared with that of non forested scenario. The water yield reduction caused by forest area increase in heavier arid regions and drier years can be greater than this average range, and even exceed 100%. For example, the annual water yield often appeared as zero (negative values) for the forestland in the loess watersheds with annual precipitation below 450 mm, and in the semi-arid loess areas of the Jinghe watershed, and for the slope plot of forest stand at the semi-arid Diediegou small watershed. This means that these forests must uptake more soil water and upslope run-in to survive. A low intensity thinning cannot lead to a significant reduction of water consumption by forest evapotranspiration. [ **Conclusion** ] Within the several spatial scales (small watershed, watershed, and region) studied on the Loess Plateau, the mean annual water yield reduction by afforestation will be 50% - 60% or more, and this reduction amplitude will increase with rising drought degree as high as to 100%, or even to a negative value of water yield because of the consumption of other water resources besides precipitation. It seems that a rational selection of proper vegetation types and forest cover within the carrying capacity of water resources is the basic approach to guarantee a safe regional water supply and to realize an integrated forest-water management.

**Keywords:** Loess Plateau; spatial scale; forest; watershed; water yield

在黄土高原等土壤侵蚀严重的干旱缺水地区,增加森林植被覆盖是降低侵蚀、改善环境的有效措施。为此,我国几十年来连续实施了“三北防护林”、“退耕还林”等生态工程,森林植被覆盖明显提高,土壤侵蚀显著降低,取得了预期成效,但伴随出现了许多流域年径流量显著减少的问题<sup>[1-2]</sup>,加剧了流域或区域水资源短缺,危及供水安全和可持续发展,并认为造林种草、水土保持等土地利用变化的作用很大<sup>[3]</sup>,因而需要格外重视林水关系和转向林水综合管理<sup>[4]</sup>;然而,对森林增加与流域径流的关系一直存在不同研究结果和学术争论,分为增加、减少和基本无关三种情况<sup>[5]</sup>,原因是流域产水同时受气候、地形、土壤、植被、流域特征等多种因素影响<sup>[6-7]</sup>。多数研究认为,增加森林会减少径流,全球范围的造林影响径流的对比流域研究成果汇总表明,平均减少年径流 227 mm (52%)<sup>[8]</sup>,但其应用数据多分布在年降水 600 mm 以上地区,缺乏干旱地区的数据。另外,由于对比流域研究格外耗时<sup>[9]</sup>,在黄土高原(甚至我国)一直没有严格的对比流域研究,现有研究多是流域径流与森林覆盖的统计分析,缺乏考虑其他森林特征,限制着从区域水安全角度来合理规划林业发展规模与指导森林经营活动。

在定量研究和深入理解森林系统结构与空间格局对水文过程影响的基础上,籍助生态水文模型定量预测森林植被变化的水文影响,尤其对产水量的影响,是弥补我国及黄土高原地区缺乏对比流域研究、尽快提供林水协调管理决策支持工具的一个捷

径。因此,自 1999 年实施退耕还林工程以来,中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所在宁夏六盘山建立了长期森林生态定位站,开展了包括观测对比、统计分析、模型模拟等方式的森林生态水文研究,涉及多个水文过程和空间尺度,发表了很多学术论文,但一直还未系统总结。本文将按区域/流域、小流域、林分等空间尺度,总结分析森林的数量和结构特征对产水量的影响,为深入认识黄土高原地区的林水关系和指导林水协调管理提供科技基础。

## 1 研究区概况

黄土高原干旱缺水、植被稀少、侵蚀严重。受气候和土地利用变化的影响,多条主要河流(如渭河、泾河、洛河、无定河及窟野河等)的年径流量自 20 世纪 80 年代以来明显减少<sup>[1-2]</sup>,对社会经济可持续发展及林业建设的限制越来越严重。

泾河流域(105°49'~108°58' E, 34°14'~38°10' N)是黄河流域十大水系之一,源于宁夏泾源,流经宁夏、甘肃和陕西注入渭河,干流全长 455.1 km,面积 45 421 km<sup>2</sup>。地处温带半湿润半干旱过渡带,为典型的温带大陆性气候,年均气温和降水量均由南向北递减,年降水量为 350~600 mm, 72%~86% 集中在 5—9 月;年均气温 8℃,最冷月 -8~-10℃,最热月 22~24℃。流域内的地形、气候、土壤和植被等差异较大。北部、西北部、东部多为半干旱区,以草地覆盖为主;东南部和西南部受山地海拔

升高的影响,森林覆盖率相对较高。土壤类型除西南部山地多为灰褐土外,其它多覆被深厚黄土。

泾河干流上游指西南部的泾川水文站以上(106°11'~107°21' E, 35°15'~35°45' N),面积3 164 km<sup>2</sup>,海拔1 026~2 922 m。分为半湿润土石山区和半干旱黄土区,土石山区海拔1 750 m以上,由六盘山及其余脉组成;黄土区海拔1 026~1 750 m。土石山区和黄土区的年降水量分别为614、475 mm,70%以上集中在6—9月;年均气温分别为6.5、8.8℃,年潜在蒸发量分别为1 419.9、1 438.4 mm。森林主要分布在土石山区,多为红桦(*Betula albosinensis* Burk.)、山杨(*Populus davidiana* Dode)、华山松(*Pinus armandi* Franch.)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)等的天然次生林,少部分为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)人工林。农田在黄土区的面积比较大,分布于川地、塬地及丘陵。草地覆盖度在土石山区达50%~70%,在黄土区则达40%~50%。

宁夏六盘山区位于泾河干流上游,最高海拔2 931 m。年降水量一般在500 mm以上,但外围半干旱区350~450 mm。大于10℃积温在山前平川为1 900℃以上。生长季约180 d,全年日照时数低于2 200 h。母岩包括石灰页岩、红色沙岩等;土壤石砾含量高,土层薄。灰褐土占总面积的94.4%。在海拔1 700~2 700 m,植被以阔叶林为主,土壤有机质含量高,形成较肥沃的山地灰褐土,质地较细、土层较薄,易遭冲刷;在海拔2 640 m以上的山体顶部,气候湿冷,生长有草甸植被,土壤为山地草甸土并有大量有机质积累,土层厚约140 cm。

六盘山区是黄土高原重要水源地,年径流量约7.3亿m<sup>3</sup>,另有地下水储量约3.24亿m<sup>3</sup>(可开发利用2.44亿m<sup>3</sup>)。六盘山区也是生物多样性富集区,丰富多样的森林植被发挥着控制侵蚀、固碳释氧、水文调节等生态效益。区域林业主导功能应是在控制土壤侵蚀的前提下,为周边地区提供数量多、质量高的水资源;同时,保护生物多样性、提供木材和其他林产品、发展生态旅游等也是重要功能;然而,受传统林业思维影响,森林主导功能过分关注木材生产,追求提高蓄积量,从20世纪70年代以来的持续造林虽使森林覆盖率大幅回升<sup>[10]</sup>,但森林结构不良、质量下降、功能低下等问题严重,尤其流域产水大幅下降,干旱胁迫危及树木健康和稳定性,多年禁伐形成了大量过密林分,即降低了木材价值,又加大了生

态耗水,还增大了雪折危险<sup>[11]</sup>,急需在深入理解林水关系的基础上实行林水协调管理,保障区域生态安全和供水安全,增强森林和林业的多种服务功能。

## 2 黄土高原区域的年径流减少与森林影响

在黄河最大支流渭河,年径流量自20世纪60年代后一直减少<sup>[12]</sup>,尤其80年代后,在1990年后甚至减至过去的1/3。相对1960—1970年,在上、中、下游1971—2009年减少的径流中,分别有13.8%、17.6%、20.7%来自降水变化,而人类活动贡献达86.2%、82.4%、79.3%<sup>[13]</sup>。毕彩霞等<sup>[14]</sup>研究表明,渭河流域华山水文站1958—2011年的径流量显著下降,从20世纪60年代的96.2亿m<sup>3</sup>降到21世纪初的46.3亿m<sup>3</sup>,减少了51.8%;在基准期1958—1994年和变化期1995—2011年间,枯、平和丰水年的年径流量分别降低64.6%、41.3%和45.5%,降水减少、蒸散增加和人类活动增强导致径流减少(33.9 mm)的贡献率分别为37.1%、11.9%和51.0%。

在渭河的最大支流泾河流域,年降水-径流关系的年代变化明显(图1),1960和1970年代的关系很相近,但之后产流率不断降低,年径流急剧减少<sup>[2,15-16]</sup>,从1960年代的50.1 mm减到21世纪初的22.3 mm。相对基准年段,降水变化对径流减少的贡献不断降低,而包括1970年代以来实施的水土保持及植被建设工程以及工农业用水增加等人类活动的贡献不断提高(表1),成为绝对的主导因素。

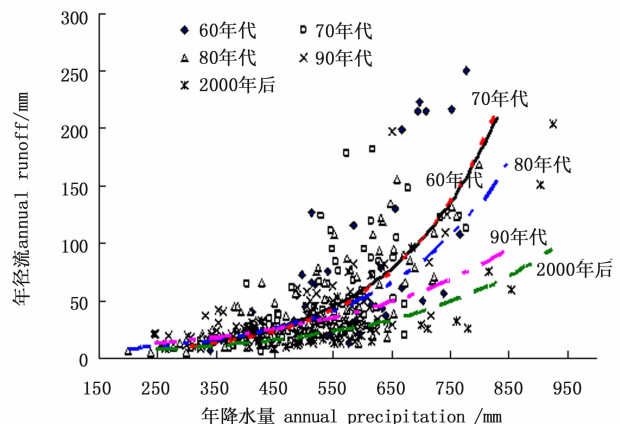


图1 泾河流域不同年代的年降水量与径流深的关系  
Fig. 1 Relation between annual precipitation and runoff in Jinghe Basin in different decades

表1 降水及人类活动对泾河流域年径流深变化的贡献率

Table 1 Contribution from precipitation and human activities to annual runoff reduction in Jinghe Basin

| 年代<br>Period        | 年降水量<br>Mean annual<br>precipitation<br>/mm | 年代径流深及其变化<br>Mean annual runoff and change/mm |                             |                           |                     | 降水<br>Precipitation  |                    | 人类活动<br>Mankind activities |                    |
|---------------------|---|---|-----------------------------|---------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
|                     |   | 基准期<br>Basic period<br>runoff                 | 实测径流量<br>Measured<br>runoff | 自然径流<br>Natural<br>runoff | 总影响<br>Total effect | 影响量<br>Effect<br>/mm | 贡献率<br>Ratio<br>/% | 影响量<br>Effect<br>/mm       | 贡献率<br>Ratio<br>/% |
|                     |   |   |                             |                           |                     |                      |                    |                            |                    |
| 1980年前 Before 1980s | 519.8                                       | 41.2  |                             |                           |                     |                      |                    |                            |                    |
| 20世纪80年代 1980s      | 501.3                                       | 41.2  | 36.6                        | 37.5                      | -4.6                | -3.7                 | 80.9               | -0.9                       | 19.1               |
| 20世纪90年代 1990s      | 474.5                                       | 41.2  | 29.9                        | 33.5                      | -11.3               | -7.7                 | 67.8               | -3.6                       | 32.2               |
| 2000年后 After 2000   | 539.3                                       | 41.2  | 20.6                        | 45.8                      | -20.6               | 4.6                  | -22.3              | -25.3                      | 122.3              |

由于缺少严格对比的流域实验,用面积 10 km<sup>2</sup> 以上的 57 个黄土高原流域的文献数据,统计分析了森林减少径流的作用<sup>[17]</sup>,表明径流系数随年降水量的增大不但没增加,反而降低(图2),说明其他因素影响已超过降水;进一步分析表明,年径流系数随森林覆盖率的升高而减小,表明森林影响很大。为了定量分析森林的影响,按整个黄土高原、年降水大于

和小于 450 mm 3 种情况,拟合了流域年均总蒸散(ET,mm)与森林面积比(*f*,小数)、非森林面积比(1-*f*,小数)、年均降水量(*P*,mm)的关系:

$$ET = P \cdot a_f \cdot f + P \cdot a_{nf} \cdot (1 - f) \quad (1)$$

式中:*a<sub>f</sub>* 和 *a<sub>nf</sub>* 表示林地和非林地的多年蒸散率或占降水比值(表2)。

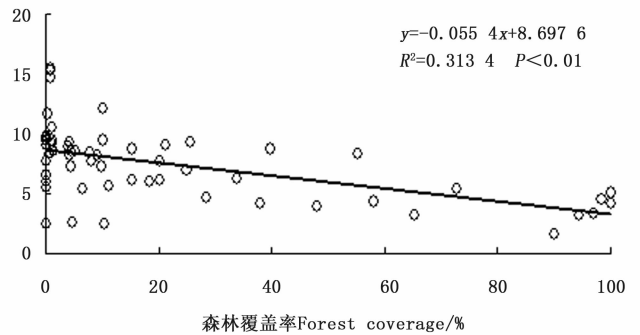
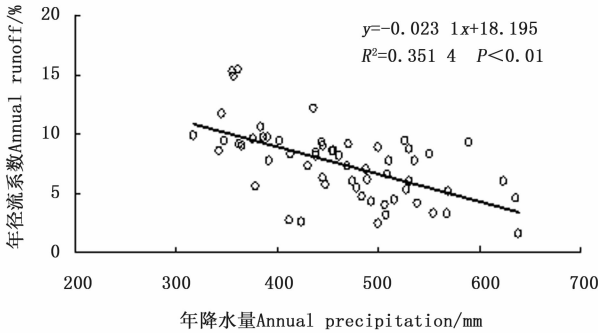


图2 黄土高原流域多年平均年径流系数随年降水量和森林覆盖率的变化

Fig. 2 Decreasing annual runoff ratio with annual precipitation and forest coverage in loess basin

表2 黄土高原流域林地和非林地的年均蒸散量和蒸散比拟合结果

Table 2 Fitted mean annual evapotranspiration (ET) and ET-ratio to mean annual precipitation (P) for forestland (*a<sub>f</sub>*) and non-forestland (*a<sub>nf</sub>*) in loess basins

| 年均降水量<br>Annual<br>precipitation<br><i>P</i> /mm | 林地蒸散率<br>ET ratio of<br>forestland<br><i>a<sub>f</sub></i> | 非林地蒸散率<br>ET ratio of<br>non-forestland<br><i>a<sub>nf</sub></i> | 林地年蒸散<br>Annual ET<br>of forestland<br><i>P</i> · <i>a<sub>f</sub></i> /mm | 非林地年蒸散<br>Annual ET of<br>non-forestland<br><i>P</i> · <i>a<sub>nf</sub></i><br>/mm | <i>R</i> <sup>2</sup> | 林地增加年<br>蒸散量<br>Increased ET<br>by forestland<br><i>P</i> · ( <i>a<sub>f</sub></i> - <i>a<sub>nf</sub></i> )<br>/mm | 林地年径流<br>Annual runoff<br>of forestland<br><i>P</i> · (1 - <i>a<sub>f</sub></i> )<br>/mm | 非林地年径流<br>Annual runoff<br>of non-forestland<br><i>P</i> · (1 - <i>a<sub>nf</sub></i> )<br>/mm | 林地增加年<br>蒸散率<br>Increased<br>ET-ratio<br>by forestland<br><i>a<sub>f</sub></i> - <i>a<sub>nf</sub></i> |
|--|--|--|--|---|-----------------------|---|--|--|--|
| 463<br>(317 ~ 639)                               | 0.966  | 0.917  | 447<br>(306 ~ 617)   | 424<br>(291 ~ 586)  | 0.98                  | 23<br>(16 ~ 31)   | 16<br>(11 ~ 22)  | 39<br>(26 ~ 53)  | 0.049  |
| 394<br>(317 ~ 448)                               | 1.064  | 0.903  | 419<br>(337 ~ 477)   | 356<br>(286 ~ 405)  | 0.91                  | 63<br>(51 ~ 72)   | -25<br>(-20 ~ 29)  | 38<br>(31 ~ 44)  | 0.161  |
| 522<br>(455 ~ 639)                               | 0.962  | 0.925  | 502<br>(438 ~ 618)   | 483<br>(421 ~ 591)  | 0.96                  | 19<br>(17 ~ 24)   | 20<br>(17 ~ 24)  | 39<br>(34 ~ 48)  | 0.037  |

在整个黄土高原,林地和非林地的年蒸散率分别为0.966和0.917,对应所有流域的年均降水量(463 mm)的年蒸散量分别是447和424 mm,年径流量分别是16和39 mm,即林地平均多耗水23 mm,林地年产水量比非林地降低59%。在年降水量大于450 mm的分区,林地和非林地的年蒸散率分别为0.962和0.925,即林地比非林地多耗水19 mm,与刘昌明等<sup>[18]</sup>的研究结果(黄土高原流域森林覆盖率增加10%平均减少年径流1.67 mm)十分接近。在年降水量低于450 mm的分区,林地和非林地的年蒸散率分别为1.064和0.903,即林地比非林地多耗水63 mm,且森林需依靠降水外的其它水源(坡面径流、土壤水、灌溉等)才能生存,导致年蒸散量超过降水量。这说明大规模造林和梯田、淤地坝等水保工程一样,也能大幅降低流域产水。

### 3 泾河干流上游流域的水量平衡和森林植被影响

要在流域内协调林水关系,需先在流域尺度量化不同森林植被的径流(蒸散)影响。为此在泾河干流上游流域,利用率定的生态水文模型SWIM<sup>[19]</sup>

开展了多情景模拟,分黄土区和土石山区评价了不同植被的蒸散及产水特征<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 流域的水量平衡

泾河干流上游,1997—2003年的年均降水为547 mm,径流41.7 mm;模拟的潜在蒸散934 mm,实际蒸散451 mm(425~545 mm),包括冠层截持40 mm、植被蒸腾157 mm、土壤蒸发253 mm。在海拔2 250~2 922 m的六盘山土石山区,森林覆盖率高,年降水量多,年蒸散达486 mm,其中,冠层截持94 mm、植被蒸腾208 mm、土壤蒸发184 mm;在海拔1 750~2 250 m的土石山区,因年降水量较低,年蒸散量降至436 mm;在海拔1 026~1 750 m的黄土区,随温度升高,年蒸散升为458 mm,其中,冠层截持降至32 mm,土壤蒸发升至275 mm。

在整个泾河干流上游,由各流域单元模拟值求和得到的年地表径流10.7 mm、壤中流31.9 mm,作为二者之和的径流量为42.6 mm,非常接近实测值41.7 mm。模拟计算的深层渗漏量为64 mm,其与径流量之和被视为产水量,为106.6 mm,远大于水文站的实测径流量,说明大部分产水在汇集过程中被消耗。此外,模型计算的产水量及其组成的区域差异明显(表3)。

表3 SWIM模型模拟的泾河上游1997—2003年的产水量组分与空间分布

Table 3 Distribution of SWIM simulated water yield and its components in Jinghe upstream in 1997—2003

| 区域 Regions                  | 海拔/m<br>Elevation | 降水量                          | 产水量            | 深层渗漏/外界交换            | 径流量        | 径流量/mm Runoff components |                  |
|-----------------------------|-------------------|------------------------------|----------------|----------------------|------------|--------------------------|------------------|
|                             |                   | Mean annual precipitation/mm | Water yield/mm | Leaching exchange/mm | Runoff /mm | 地表径流<br>Surface runoff   | 壤中流<br>Interflow |
| 黄土区 Loess area              | 1 026~1 350       | 515.4                        | 78.9           | 54.9                 | 24.1       | 19.3                     | 4.7              |
|                             | 1 350~1 750       | 513.5                        | 72.5           | 59.8                 | 12.7       | 8.4                      | 4.3              |
| 土石山区 Stony mountainous area | 1 750~2 250       | 590.0                        | 158.9          | 85.3                 | 73.6       | 11.8                     | 61.7             |
|                             | 2 250~2 922       | 640.8                        | 163.8          | 26.9                 | 137.0      | 2.6                      | 134.4            |
| 全流域 Total watershed         |                   | 547.2                        | 106.6          | 64.0                 | 42.6       | 10.7                     | 31.9             |

#### 3.2 不同森林类型的水量平衡

泾河干流上游森林覆盖率为26.8%,其中,20.5%在土石山区(637.3 km<sup>2</sup>),6.3%在黄土区(193.9 km<sup>2</sup>)。从模拟结果中抽取了主要森林类型的多年水量平衡及分量组成(表4)。土石山区林地年蒸散为479.1~519.4 mm,算术和面积加权平均分别为505和511.5 mm;灌丛年蒸散429.2 mm。黄土区主要是刺槐和杨树人工林,年均蒸散507.2 mm;灌丛年蒸散503.0 mm。总的来说,森林蒸散高于其它植被,其占年降水量的比例为黄土区平均达99%,土石山区平均达84%。

在森林年蒸散组分及比例中,冠层截留量为

86.1~116.8 mm(15%~22%),占总蒸散的17.0%~23.5%;灌丛截留量60.1~65.6 mm(10%),占总蒸散的12%。土壤蒸发和植物蒸腾的区域差异明显,黄土区稀疏林地的土壤蒸发大于土石山区较密林地,土石山区的森林年蒸腾量比黄土区的大。灌丛蒸腾明显小于林地,黄土区和土石山区分别为188.4、173.4 mm。

在降水少的黄土区,森林和灌丛的年总产水量(地表径流、壤中流与深层渗漏之和)几乎为0,且基本都是地表径流;在降水多的土石山区,森林平均年总产水量为88.8(62.7~119.5)mm,灌丛为156.5 mm,且壤中流比例很大,地表径流很小,说明土石山

区森林水源涵养作用大。

在黄土区,各类森林的深层渗漏量均小于0,在土石山区也不高(4.6~15.5 mm),且山杨林渗漏

值也小于0,说明森林蒸散耗水能力很大;但土石山区灌丛渗漏量(79.2 mm)较大,可能因其土层较薄且根系分布相对较浅。

表4 泾河上游1997—2003年典型森林和灌丛的SWIM模型模拟的水量平衡分量

Table 4 Water balance components of typical forests/shrubs simulated by SWIM in Jinghe in 1997—2003 mm

| 区域<br>Region                   | 森林植被类型<br>Forest/vegetation types | 降水量<br>Annual precipitation | 实际蒸散<br>Actual ET | 蒸散分量<br>ET components    |                      |                             | 径流量<br>Runoff | 径流分量<br>Runoff components |                  | 深层渗漏/<br>外界交换<br>Leaching/<br>exchange | 产水量<br>Water yield |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|------------------|--|--------------------|
|                                |                                   |                             |                   | 土壤蒸发<br>Soil evaporation | 蒸腾量<br>Transpiration | 林冠截留<br>Canopy interception |               | 地表径流<br>Surface runoff    | 壤中流<br>Interflow |  |                    |
| 黄土区<br>Loess area              | 灌丛 Shrubs                         | 513.9                       | 503.0             | 254.4                    | 188.4                | 60.1                        | 0.2           | 0.1                       | 0.0              | -8.6                                   | -8.4               |
|                                | 刺槐、杨树林<br>Black locust or poplar  | 514.4                       | 507.2             | 197.4                    | 196.4                | 113.4                       | 0.0           | 0.0                       | 0.0              | -13.8                                  | -13.8              |
| 土石山区<br>Stony mountainous area | 栎树林 Oak                           | 580.2                       | 519.4             | 192.8                    | 240.5                | 86.1                        | 51.3          | 0.6                       | 50.7             | 11.3                                   | 62.7               |
|                                | 桦树林 Birch                         | 599.0                       | 512.2             | 160.3                    | 258.0                | 94.0                        | 83.9          | 1.3                       | 82.5             | 4.6                                    | 88.4               |
|                                | 山杨林 Poplar                        | 593.0                       | 511.4             | 182.3                    | 217.4                | 111.7                       | 83.1          | 0.8                       | 82.3             | -0.3                                   | 82.9               |
|                                | 华山松、油松、云杉林<br>Pine or spruce      | 598.6                       | 479.1             | 138.5                    | 228.9                | 111.7                       | 104.1         | 2.0                       | 102.0            | 15.5                                   | 119.5              |
|                                | 华北落叶松林 Larch                      | 595.5                       | 506.9             | 177.5                    | 212.7                | 116.8                       | 85.8          | 1.5                       | 84.3             | 4.9                                    | 90.7               |
|                                | 山地灌丛 Shrubs                       | 592.7                       | 429.2             | 190.1                    | 173.4                | 65.6                        | 77.3          | 5.3                       | 72.0             | 79.2                                   | 156.5              |

### 3.3 不同农田类型的水量平衡

泾河干流上游农田面积占42%,主要在黄土区。模拟结果(表5)表明:黄土区各类农田年蒸散447.3~470.1 mm,占降水的比例为86%~92%,均大于土石山区麦田(425.8 mm)。各类农田年总产水量以土石山区麦田的最高(159.6 mm),主要组成为壤中流和深层渗漏;而黄土区各类农田为44.0~70.1 mm,主要组成为深层渗漏。各类农田的年

径流量(地表径流与壤中流之和)差别很大,黄土区变化在3.5~6.2 mm,平均4.8 mm,且以地表产流为主,显著低于以壤中流为主但地表径流也较高的土石山区麦田(96.9 mm)。各类农田的深层渗漏都是正值,即输水补给深层土壤水/地下水,其中,土石山区麦田62.7 mm,黄土区各类农田41.1~63.9 mm。

表5 泾河上游1997—2003年典型农田的SWIM模型模拟的水量平衡分量

Table 5 Water balance components of croplands simulated by SWIM in Jinghe upstream in 1997—2003 mm

| 区域<br>Region                   | 植被类型<br>Vegetation type | 降水量<br>Annual precipitation | 实际蒸散<br>Actual ET | 蒸散分量<br>ET components    |                      |                             | 径流量<br>Runoff | 径流分量<br>Runoff components |                  | 深层渗漏/<br>外界交换<br>Leaching/<br>exchange | 产水量<br>Water yield |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|------------------|--|--------------------|
|                                |                         |                             |                   | 土壤蒸发<br>Soil evaporation | 蒸腾量<br>Transpiration | 冠层截留<br>Canopy interception |               | 地表径流<br>Surface runoff    | 壤中流<br>Interflow |  |                    |
| 黄土区<br>Loess area              | 旱塬麦田<br>Dryland wheat   | 512.5                       | 455.2             | 238.2                    | 185.1                | 32.0                        | 4.6           | 4.5                       | 0.1              | 52.6                                   | 57.2               |
|                                | 梯田麦田<br>Terrace wheat   | 517.4                       | 447.3             | 242.2                    | 175.0                | 30.1                        | 6.2           | 6.2                       | 0.1              | 63.9                                   | 70.1               |
|                                | 川地麦田<br>Valley wheat    | 514.1                       | 470.1             | 231.8                    | 201.6                | 36.7                        | 3.5           | 3.2                       | 0.3              | 40.5                                   | 44.0               |
|                                | 玉米农田<br>Corn farmland   | 514.8                       | 466.0             | 193.0                    | 231.9                | 41.1                        | 4.7           | 4.6                       | 0.1              | 44.1                                   | 48.8               |
| 土石山区<br>Stony mountainous area | 山地麦田<br>Mountain wheat  | 585.4                       | 425.8             | 263.6                    | 142.5                | 19.7                        | 96.9          | 15.1                      | 81.8             | 62.7                                   | 159.6              |

### 3.4 不同草地的水量平衡

草地在流域内面积最大,产水贡献也最高。模拟表明(表6):土石山区人工草地的年蒸散量和占

降水的比例(503.9 mm,89%)明显大于土石山区自然草地(377.7 mm,63%)和黄土区自然草地(420.4 mm,81%),甚至高于各类农田和森林。这是因土石

山区人工草地的生物量大,因而其冠层截留(38.5 mm),虽然其土壤蒸发(255.8 mm)低于黄土区自然草地(301.4 mm)和蒸腾(209.7 mm)明显高于黄土区自然草地(13.5、105.4 mm)和土石山区自然草地(16.5、48.5 mm)。

表6 泾河上游1997—2003年主要草地及其他土地利用的SWIM模型模拟的水量平衡分量

Table 6 Components of water balance of typical grassland and other land use types simulated by SWIM in Jinghe upstream in 1997—2003

| 区域<br>Region                   | 植被类型<br>Vegetation type     | 降水量<br>Annual precipitation | 实际蒸散<br>Annual precipitation | 蒸散分量<br>ET components    |                      |                             | 径流量<br>Runoff | 径流量<br>Runof components |                  | 深层渗漏/<br>外界交换<br>Leaching/<br>exchange | 产水量<br>Water yield |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------|-------------------------|------------------|--|--------------------|
|                                |                             |                             |                              | 土壤蒸发<br>Soil evaporation | 蒸腾量<br>Transpiration | 冠层截留<br>Canopy interception |               | 地表径流<br>Surface runoff  | 壤中流<br>Interflow |  |                    |
| 黄土区<br>Loess area              | 自然草地<br>Natural grassland   | 513.9                       | 420.4                        | 301.4                    | 105.4                | 13.5                        | 6.7           | 4.4                     | 2.3              | 86.8                                   | 93.5               |
| 土石山区<br>Stony mountainous area | 人工草地<br>Planted grassland   | 562.0                       | 503.9                        | 255.8                    | 209.7                | 38.5                        | 0.0           | 0.0                     | 0.0              | 58.1                                   | 58.1               |
|                                | 山地自然草地<br>Natural grassland | 591.2                       | 377.7                        | 312.7                    | 48.5                 | 16.5                        | 33.6          | 5.1                     | 28.5             | 179.9                                  | 213.5              |
| 全流域<br>Total                   | 水域<br>Waterbodies           | 550.3                       | 985.8                        |                          |                      |                             | 550.3         | 550.3                   | --               |  | -435.5             |
| watershed                      | 居民地<br>Settlement area      | 527.1                       | 120.3                        |                          |                      |                             | 406.8         | 159.3                   | 247.5            |  | 406.8              |

年总产水量为土石山区自然草地(213.5 mm)显著大于土石山区人工草地(58.1 mm)和黄土区自然草地(93.5 mm)。年径流(地表径流与壤中流之和)是土石山区人工草地最低,几乎为0;黄土区自然草地为6.7 mm,以地表径流为主;土石山区自然草地最大,为33.6 mm,且以壤中流为主。深层渗漏量为山地自然草地最大(179.9 mm),比土石山区人工草地(58.1 mm)和黄土区自然草地(86.8 mm)分别高121.8、93.1 mm。总的来看,无论土石山区还是黄土区,各类草地的深层渗漏均为正值,且有较大产水功能。

水域和居民地对流域水量平衡有特殊作用。水域的年蒸发量最大(985.8 mm);由于饱和不透水,径流量接近降水量(550.3 mm),但蒸发量高使其净产水为负值。居民地由于地面硬化,产水量最大,高达406.8 mm,其中,地表产流159.3 mm,表层土壤快速壤中流247.5 mm。

### 3.5 不同植被类型的水量平衡比较

在不区分黄土区和土石山区时,整个泾河干流上游内1997—2003年的各地类年均水量平衡分量模拟计算值见表7。

表7 泾河上游不同植被覆盖类型1997—2003年水量平衡分量平均值的比较

Table 7 Comparasion of component of water balance of different vegetation cover in Jinghe upstream in 1997—2003

| 年水量平衡分量<br>Water budget components | 农田<br>Farmland | 自然草地<br>Natural grassland | 人工草地<br>Planted grassland | 灌丛<br>Shrubs | 乔木林<br>Forests |
|------------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|----------------|
| 降水量 Annual precipitation           | 528.8          | 552.5                     | 562.0                     | 543.6        | 576.6          |
| 实际蒸散 Actual ET                     | 452.9          | 399.0                     | 503.9                     | 464.8        | 500.5          |
| 土壤蒸发 Soil evaporation              | 233.7          | 307.1                     | 255.8                     | 222.3        | 174.8          |
| 植被蒸腾 Plant transpiration           | 187.2          | 76.9                      | 209.7                     | 179.6        | 220.1          |
| 冠层截留 Canopy interception           | 31.9           | 15.0                      | 38.4                      | 62.9         | 105.6          |
| 径流量 Runoff                         | 23.2           | 20.1                      | 0.0                       | 56.0         | 82.9           |
| 地表径流 Surface runoff                | 6.7            | 4.7                       | 0.0                       | 2.2          | 0.5            |
| 壤中流 Interflow                      | 16.5           | 15.4                      | 0.0                       | 53.7         | 82.5           |
| 深层渗漏/外界交换 Leaching / exchange      | 52.8           | 133.4                     | 58.1                      | 22.8         | -6.8           |
| 产水量 Water yield                    | 75.9           | 153.5                     | 58.1                      | 78.8         | 76.1           |

实际年蒸散量(mm)为人工草地(503.9) > 乔木林(500.5) > 灌丛(464.8) > 农田(452.9) > 自

然草地(399.0)。从蒸散分量看,土壤蒸发(mm)为自然草地(307.1) > 人工草地(255.8) > 农田

(233.7) > 灌丛(222.3) > 乔木林(174.8); 冠层截留(mm)为乔木林(105.6) > 灌丛(62.9) > 人工草地(38.4) > 农田(31.9) > 自然草地(15.0); 植被蒸腾(mm)为乔木林(220.1) > 人工草地(209.7) > 农田(187.2) > 灌丛(179.6) > 自然草地(76.9)。

年均径流量(mm)为林地(82.9) > 灌丛(56.0) > 农田(23.2) > 自然草地(20.1) > 人工草地(0.0), 其中, 壤中流(mm)为乔木林(82.5) > 灌丛(53.7) > 农田(16.5) > 自然草地(15.4) > 人工草地(0), 地表径流(mm)为农田(6.7) > 自然草地(4.7) > 灌丛(2.2) > 乔木林(0.5) > 人工草地(0.0)。农田的壤中流较大, 主要因山地麦田壤中流较高, 而黄土区农田壤中流几乎为0。

深层渗漏/外界交换水量(mm)为自然草地(133.4) > 人工草地(58.1) > 农田(52.8) > 灌丛(22.8) > 乔木林(-6.8)。灌丛有深层渗漏, 主要因土石山区灌丛深层渗漏较大; 黄土区灌丛与林地深层渗漏均为负值, 需消耗土壤水或上坡汇入径流等外界输入水分。

年总产水量(mm)为自然草地(153.5) > 灌丛(78.8) > 乔木林(76.1) > 农田(75.9) > 人工草地(58.1)。

#### 4 六盘山香水河小流域植被变化对年产水的影响

六盘山香水河小流域现有森林主要是次生林(覆盖率约58%), 还有一些华北落叶松、青海云杉等人工林。基于1996—2007年的气象数据(平均年降水量640 mm), 利用SWIM模型模拟了树种替换及森林面积变化(0%~99.7%)系列情景对年产水量的影响, 并以小流域全无森林覆盖时(87.8%为草地、12.1%为灌丛)的年产水量为基准进行评价<sup>[20]</sup>。

研究表明: 在华北落叶松替换为山杨或桦树的成熟林(最大叶面积指数(LAI)分别为5.5、2.4和3.9)后, 年产水量变化很小。当占小流域面积23.8%的华北落叶松林变化为桦树林后, 年均产水量几乎没有变化; 变为山杨林后, 流域面积10%的树种替换导致年产流仅增加2.7 mm, 相当于华北落叶松林年产流深的5.2%。这可解释为该小流域的年蒸散量主要受控于土壤水分和气象条件而不是林冠LAI大小。实际上, 在LAI达到2~3时, 年蒸散量就接近其最大值了; 然而, 植被类型变化能强烈影响年产水量。在整个小流域覆盖森林后, 年产流深平均降低了158 mm, 即草地转为林地能显著降低产水量, 增加流域面积10%的森林平均减少年产水深15.8 mm, 这远大于半干旱区叠叠沟小流域的径流降低值(5~10 mm), 是因香水河年降水量比叠叠沟高199 mm。总体来看, 年产水减少量随森林覆盖率的增加近线性增大。因年降水量变化(372~966 mm), 小流域完全覆盖森林后的年产水减少量波动很大(93~213 mm), 对应年产流减少率为38%~86%, 12年的平均值为59%, 即年产流为无森林覆盖对照情景的41%。

#### 5 典型样地植被的蒸散和水量平衡特征

##### 5.1 蒸散对林木密度和叶面积指数的响应

为指导林水协调管理, 需定量理解林分结构调控(间伐、择伐、LAI变化等)的水文作用。2002年在半干旱的赵千户林场将华北落叶松林、山桃林、沙棘灌丛密度通过间伐从2 500、3 333、3 333株·hm<sup>-2</sup>降至1 667、2 500、2 500株·hm<sup>-2</sup>, 间伐强度分别为33%、25%、25%, 之后的生长季(5—10月, 降水404.4 mm)各蒸散分量见表8<sup>[21]</sup>。

表8 六盘山赵千户林场不同树种的林分密度对生长季(5—10月, 降水404.4 mm)蒸散的影响

Table 8 Stand density effect on growing season ET in Zhaoqianhu Forestry Farm of Liupan Mountains mm

| 植被类型样地<br>Vegetation plots       | 密度<br>Density/<br>(株·hm <sup>-2</sup> ) | 总蒸散<br>Total<br>ET | 林木蒸腾<br>Tree<br>transpiration | 林下植被蒸腾<br>Understory<br>transpiration | 林冠截持<br>Forest canopy<br>interception | 枯落物截持<br>Humus layer<br>interception | 土壤蒸发<br>Soil<br>evaporation |      |
|----------------------------------|---|--------------------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------|
| 华北落叶松林<br>Larch plantation       | 对照样地 Control                            | 2 500              | 449.1                         | 192.7                                 | 80.5                                  | 68.3                                 | 51.2                        | 56.3 |
| 山桃林<br>Mountain beach plantation | 间伐样地 Thinned                            | 1 667              | 413.1                         | 145.1                                 | 92.7                                  | 46.6                                 | 68.0                        | 60.6 |
| 沙棘灌丛<br>Sea-buckthorn shrubs     | 对照样地 Control                            | 3 333              | 399.7                         | 241.2                                 | 72.2                                  | 44.7                                 | -                           | 41.7 |
|                                  | 间伐样地 Thinned                            | 2 500              | 391.3                         | 202.2                                 | 77.3                                  | 39.5                                 | -                           | 72.4 |
|                                  | 对照样地 Control                            | 3 333              | 362.8                         | 194.7                                 | 69.0                                  | 46.7                                 | -                           | 52.5 |
|                                  | 间伐样地 Thinned                            | 2 500              | 439.6                         | 255.9                                 | 73.5                                  | 44.7                                 | -                           | 65.4 |



间伐之后,华北落叶松林、山桃林、沙棘灌丛的总蒸散变化分别为-8%、-2%和+21%。落叶松林和山桃林的林木蒸腾虽有所减少,但减少比例远低于间伐强度,说明间伐后个体蒸腾增大;沙棘灌丛蒸腾量不但未减少,反而显著增加,可能因间伐刺激了沙棘生长和蒸腾。由于间伐后落叶松林冠恢复较慢,而山桃和沙棘恢复较快,林冠截持量减少强度对落叶松林是略低于间伐强度,对山桃林和沙棘灌丛则是显著低于间伐强度,尤其沙棘几乎能很快恢复到间伐前水平。因间伐后林下光照增强,林下植被蒸腾无一例外地升高,3种植被类型的土壤蒸发和枯落物截持在间伐后都有所增加。

综合来看,林分蒸散随林分密度的变化较复杂。首先,林分蒸散一般随密度的降低而减小,但不是相同比例地线性下降,还需采用其他植被特征(如叶面积指数)进行描述;其次,不同植被类型的间伐响应各异,似乎有种趋势,从乔木、亚乔木到灌木,间伐后的冠层恢复能力在增强,即间伐减少蒸散的作用在变弱。因此,需思考间伐对减少蒸散或增加产水的作用究竟有多大?什么间伐强度才有明显作用?不同植被种类的差别多大?这还需很多严格对比实验和理论研究;但至少可以肯定,在干旱缺水地区恢复草地、稀树草原植被或稀树灌丛式植被,利于更多产水。

多年的研究表明,林地蒸散受冠层 LAI 直接影响,随 LAI 的增加而增大,还受土壤含水量与气象条件的影响,同时,蒸散各组分均与林冠 LAI 有紧密关系。在叠叠沟华北落叶松林,单株日蒸腾( $y, L \cdot d^{-1}$ )随林冠 LAI( $x$ )的增加而增大( $y = 0.0242 + 0.4187x - 0.0161x^2, R^2 = 0.56$ )。冠层截持同时受林冠截持容量和雨中气象条件的影响,其中,截持容量等于叶面水膜厚度与 LAI 的乘积,所以与 LAI 直接相关<sup>[22]</sup>。林下蒸散由土壤蒸发、草灌蒸腾和地被物截持等组成,在香水河小流域,日均林下蒸散量( $mm \cdot d^{-1}$ )为稀植乔木的天然灌丛(1.09) > 华北落叶松+灌木复层林(0.96) > 天然灌丛(0.88) > 华北落叶松纯林(0.69),表现为随林冠层 LAI 的增大而减小的近线性关系( $Y = 3.2441 - 1.7596 \cdot \ln(X), R^2 = 0.64$ )。

## 5.2 典型植被类型样地的生长季蒸散与产水量

坡面水量平衡场的多年观测结果表明,不管乔、灌、草任何植被,只要地面覆盖很好,地表径流和 0~50 cm 浅层壤中流均很低,即使 2004 年 6 月 30 日

一场 100 mm 以上的大暴雨时也很少;在 2006 年和 2007 年生长季,不同植被样地的地表径流占降水量的比率基本都在 0.5% 左右,壤中流比率也不到 0.5%。利用坡面小区人工漫流供水强度和出流量稳定时的产流强度,反推计算了叠叠沟小流域不同植被的土壤稳渗速率( $mm \cdot min^{-1}$ ),其均值为:天然草地(5.3) > 虎榛子灌丛(5.1) > 沙棘灌丛(4.3) > 华北落叶松林地(3.8),均远高于可能的瞬时降雨强度<sup>[23]</sup>,由此可解释为什么地表径流和浅层壤中流很少。这说明,在六盘山土石山区分析植被的水分平衡及产水影响时,可将地表径流和浅层壤中流忽略;产水能力的植被类型差别主要体现在深层渗漏量上。基于此,某时段内一定土层的水量平衡方程为:降水量 = 蒸散量 + 土壤蓄水变化量 + 平衡项。其中,土壤蓄水变化量为正值时表示土壤水分增加,负值时表示减小;平衡项包括地表径流、壤中流、深层渗漏等产流组分,也包括与相邻土层的水分交换或水分侧向移动,正值表示发生了深层渗漏或侧向流输出,负值表示得到了土壤水分的垂直补充或上方侧向补充。

表 9 表明了叠叠沟小流域不同植被类型的蒸散组分与水量平衡组成。在 2004 年生长季(6—9 月),降水量 378 mm,半阳坡草地和阳坡草地的蒸散分别为 204.2 和 237.8 mm,灌丛的为 374.1 mm,缓坡坡脚华北落叶松和陡坡阴坡华北落叶松林的蒸散分别为 415.6 和 384.3 mm。半阳坡草地和阳坡草地的产水量分别为 161.5、120.0 mm,远大于沙棘灌丛(24.1 mm)和陡坡华北落叶松林(3.9 mm),缓坡华北落叶松林产水量甚至是负值(-57.9 mm)<sup>[24]</sup>。

在 2010—2012 年生长季,叠叠沟半阳坡和阳坡草地的蒸散在每年的水分输出项中都最大;土壤水分变化有正也有负,但阳坡变幅大于半阳坡。每年水量平衡项(产水量)都是正值,2010 年分别是 163.6、132.7 mm,2011 年为 85.9、3.0 mm;2012 年高达 247.6、287.7 mm。2012 年蒸散高出前 2 年很多,0~100 cm 土层水分变化也不同于前 2 年,表现为负值,说明土壤水分消耗超出补给,这可能与这年降水充沛导致植被生长更好有关。

叠叠沟阴坡华北落叶松林样地,2010 年生长季蒸散中最大分量是树木蒸腾(214.6 mm,47.71%),其次是林下蒸散(166.4 mm,37.00%)和林冠截持(86.8 mm,19.30%);0~100 cm 土层水分变化为 20.3 mm(4.51%),说明土壤水分增加;产水量为

-38.3 mm。2011年各水量平衡分量及其所占比例与2010年有别,但基本规律变化不大,其中林下蒸散(257.3 mm)及其占降水比例(59.14%)明显提升,可能由于当年林冠叶面积指数降低在限制林木蒸腾的同时促进了林下植被和土壤的蒸散;总体看

来,2011年水分消耗较2010年加剧,产水量为-109.3 mm。2012年生长季降水非常充沛,达526 mm,因而林地也有水分盈余,形成了一定产水(51.2 mm)。

表9 叠叠沟不同典型植被样地生长季内水量平衡

Table 9 Water budget during growing season for different vegetation plots at Diediegou

| 年份<br>Year | 时段<br>Period    | 降水量<br>Rainfall | 植被类型<br>Vegetation types                            | 林冠截持<br>Canopy<br>intercep-<br>tion | 树木蒸腾<br>Tree<br>transpi-<br>ration | 林下<br>蒸散<br>Forest<br>floor ET | 总蒸散<br>Total<br>ET | 0~100 cm 土壤<br>含水变化<br>0~100 cm soil<br>layer water change | 产水量<br>Water<br>yield |
|------------|-----------------|-----------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------|--|-----------------------|
| 2004       | 6—9月            | 378.0           | 阳坡草地<br>Sunny grasslands                            | -                                   | -                                  | -                              | 237.8              | 20.1   | 120.0                 |
|            |                 |                 | 半阳坡草地<br>Half-sunny grassland                       | -                                   | -                                  | -                              | 204.2              | 12.4   | 161.5                 |
|            |                 |                 | 沙棘灌丛<br>Sea-buckthorn shrubs                        | 66.0                                | 138.8                              | 169.3                          | 374.1              | -20.2  | 24.1                  |
|            |                 |                 | 陡坡阴坡华北落叶松林<br>Larch plantation on steep shady slope | 24.4                                | 184.0                              | 175.9                          | 384.3              | -10.2  | 3.9                   |
|            |                 |                 | 缓坡坡脚华北落叶松林<br>Larch plantation at gentle slope foot | 35.8                                | 202.7                              | 177.1                          | 415.6              | 20.2   | -57.9                 |
| 2010       | 05-19—<br>10-30 | 449.8           | 阳坡草地<br>Sunny grassland                             | -                                   | -                                  | -                              | 251.3              | 65.9   | 132.7                 |
|            |                 |                 | 半阳坡草地<br>Half-sunny grassland                       | -                                   | -                                  | -                              | 223.0              | 63.3   | 163.6                 |
|            |                 |                 | 阴坡华北落叶松林<br>Shady larch plantation                  | 86.8                                | 214.6                              | 166.4                          | 467.8              | 20.3   | -38.3                 |
| 2011       | 05-25—<br>10-26 | 429.0           | 阳坡草地<br>Sunny grassland                             | -                                   | -                                  | -                              | 313.0              | 112.9  | 3.0                   |
|            |                 |                 | 半阳坡草地<br>Half-sunny grassland                       | -                                   | -                                  | -                              | 299.9              | 43.2   | 85.9                  |
|            |                 |                 | 阴坡华北落叶松林<br>Shady larch plantation                  | 76.4                                | 108.3                              | 257.3                          | 442.0              | 96.2   | -109.3                |
| 2012       | 05.10—<br>10.25 | 526.0           | 阳坡草地<br>Sunny grassland                             | -                                   | -                                  | -                              | 355.1              | -116.75  | 287.7                 |
|            |                 |                 | 半阳坡草地<br>Half-sunny grassland                       | -                                   | -                                  | -                              | 384.6              | -106.2   | 247.6                 |
|            |                 |                 | 阴坡华北落叶松林<br>Shady larch plantation                  | 71.9                                | 180.4                              | 339.8                          | 592.1              | -117.3   | 51.2                  |

从多年研究来看,半干旱区的阴坡华北落叶松林的生长季蒸散在多数年份超过同期降水量,属水分消耗型,一般需依靠降水外的其他水分输入维持生存,仅在丰水年才可能产生径流。华北落叶松林利用降水外的水源,除土壤水分外,还可能包括坡上汇入地表径流和壤中流。由于有边墙阻拦地表径流,因此,可能是上坡壤中流输入或/和深层土壤水分提升。

在半湿润区的香水河小流域,2011年生长季降水量为772.5 mm(表10),华北落叶松林最大水分输出是树木蒸腾(204.5 mm,26.5%),其次是林冠截持(201.4 mm,26.1%)和林下蒸散(153.1 mm,19.8%);0~100 cm 土层水分变化量为71.7 mm(9.3%),说明土壤水分含量增加;平衡项为141.7 mm,占同期降水量的18.3%。华山松林的林冠截持和树木蒸腾更高些,林下蒸散与华北落叶松林相近,

但0~100 cm 土层的土壤水分稍微降低,各水量平衡分项的相互作用使水量平衡项为118 mm,也具备较高产水能力。

在图3中,利用蒸散量和同期降水量的比值比较了不同时期和地点的各类植被样地的蒸散或产水差别。由图3可看出:在降水相对充沛的半湿润区,乔木林地也能产生较多径流,这不同于半干旱区;然

而,在半干旱区,自然草地属径流生产型,是主要产水地类;灌丛和小乔木林属水分平衡型,仅产生少量径流;乔木林和人工草地属水分消耗型,其蒸散可超出降水量,很难产出径流,尤其种植生长快、生物量大的人工牧草时难以起到节水效果。由此看来,合理选择植被类型是实现节水型植被恢复和维持一定产水的关键<sup>[24]</sup>。

表10 香水河小流域华北落叶松林和华山松林2011年生长季的水量平衡

Table 10 Water budget during growing season in 2011 for forest plots at Xiangshuihe

| 样地<br>Plot                  | 时段 Period<br>(月—日)<br>(Month—Day) | 降水量<br>Rainfall | 林冠截持<br>Canopy<br>interception | 树木蒸腾<br>Tree<br>transpiration | 林下蒸散<br>Forest<br>floor ET | 总蒸散<br>Total<br>ET | 0~100 cm 土壤含水变化<br>Soil water change in<br>0~100 cm soil layer | 平衡项<br>Water<br>yield |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|--|-----------------------|
| 华北落叶松林<br>Larch plantation  | 05-24—10-20                       | 772.5           | 201.4                          | 204.5                         | 153.1                      | 559.0              | 71.7   | 141.7                 |
| 华山松林<br>Armandi pine forest | 05-24—10-20                       | 772.5           | 267.2                          | 238.2                         | 151.9                      | 657.3              | -3.0   | 118.0                 |

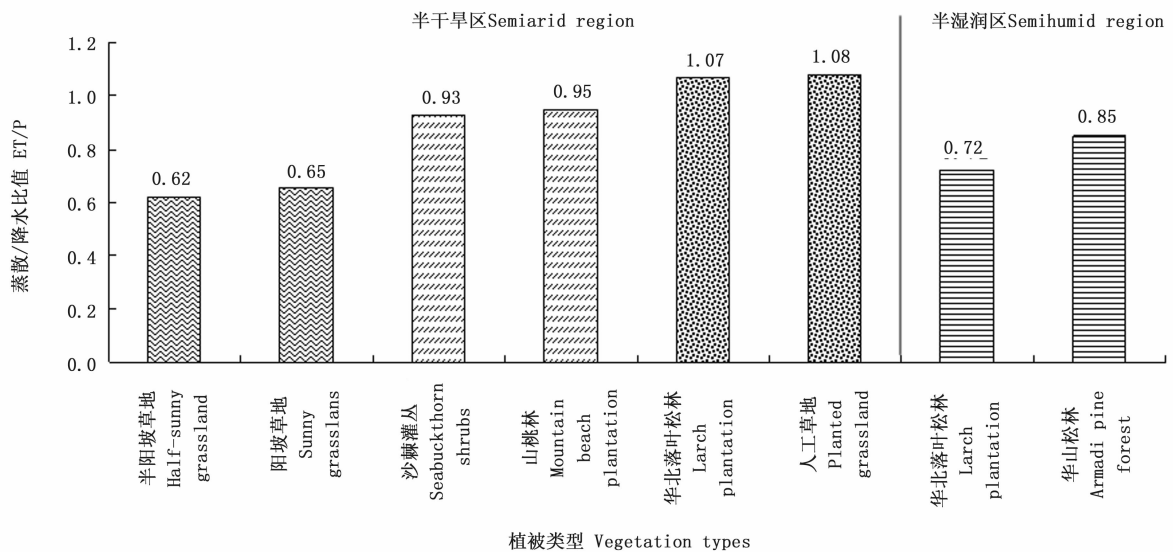


图3 六盘山半干旱区及半湿润区不同植被类型样地的生长季蒸散量和降水量的比值

Fig. 3 Variation of the ratio of evapotranspiration (ET) to precipitation (P) (ET/P) in growing season on different vegetation type plots in the semiarid and semihumid areas of Liupan Mountains

## 6 结论

总结了在黄土高原及泾河流域和六盘山区从样地、小流域、流域和区域等空间尺度上多年开展的森林产流影响研究结果,表明人类活动在不断增强,已成为流域产流减少的主因,而且增加森林面积是导致产流减少的重要原因。对整个黄土高原(年均降水量463 mm)而言,林地年均径流(16 mm)为非林地(39 mm)的41%,即减少了59%(23 mm),高于全球平均减幅(52%)<sup>[8]</sup>,且年径流减少量随流域年降水量的减少而增大的差别很大,在年降水量低于450 mm时,林地不但难以产生径流,还需依靠消耗

额外水源(即产流贡献为负值)。在泾河干流上游流域(年均降水量547 mm),年总产水量表现为乔木林(76 mm)仅为自然草地(154 mm)的49%,即降低了51%,但在半干旱黄土区和半湿润土石山区差别很大,其中,黄土区(年均降水量514 mm)乔木林年产水量为零(负值),而自然草地为93.5 mm;土石山区(年均降水量593 mm)乔木林平均年产流量88.8 mm,仅为自然草地(213.5 mm)的42%,即降低了58%。在半湿润的香水河小流域(年均降水量640 mm),完全覆盖森林后的多年平均产流为无森林覆盖对照情景的40.7%,即降低了59%。在半干旱的叠叠沟小流域典型植被坡面样地上,阴坡华北落叶

松人工林的生长季产水量在枯水年和平水年均为零(负值,即消耗其他水源),仅在丰水年生长季(降水量 526 mm)观测到产水量 51.2 mm,但仅为阳坡草地的 18% 和半阳坡草地的 21%。综合来看,在研究的几个空间尺度内,不论黄土高原的小流域、流域和区域尺度,造林后的年产水量减少率平均都在 50%~60% 以上,在干旱年份和地区会达到和超过 100%,即需消耗土壤水和坡上汇入径流来维持生存。这是由于森林的叶面积更大和根系更深,导致了更高的截持和蒸腾及总蒸散损失。低度间伐不能显著和长期减少森林蒸散耗水,依据水分承载力合理选择待恢复植被类型,将乔木林覆盖率维持在水分承载力范围内,将是保障区域供水安全和实现林水协调管理的基本途径。

### 参考文献:

- [1] 张晓萍,张 楷,王 勇,等. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析[J]. 中国水土保持科学,2009,7(1): 19-26.
- [2] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等. 泾河流域近 50 年来的径流时空变化与驱动力分析[J]. 地理科学,2011,31(6): 721-727.
- [3] 刘昌明,李艳忠,刘小莽,等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. 人民黄河,2016,38(10): 7-12.
- [4] Wang Y H, Bonell M, Feger K H, *et al.* Changing forestry policy by integrating water aspects into forest/vegetation restoration in dryland areas in China [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2012, 26(1): 59-67.
- [5] 陈军锋,李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. 自然资源学报,2001,16(5): 474-480.
- [6] 李文华,何永涛,杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报,2001,16(5): 398-406.
- [7] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5918.
- [8] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, *et al.* Trading water for carbon with biological carbon sequestration [J]. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [9] 魏晓华,李文华,周国逸,等. 森林与径流关系——一致性和复杂

性[J]. 自然资源学报,2005,20(5): 761-770.

- [10] 李怀珠. 论宁夏六盘山地区针阔混交水源涵养林工程建设现状及发展规划[J]. 宁夏农林科技,1999,(3): 22-24.
- [11] 郝 佳,熊 伟,王彦辉,等. 宁夏六盘山华北落叶松人工林雪害的影响因子[J]. 林业科学,2012,48(7): 1-7.
- [12] 孙 悦,李栋梁,朱拥军. 渭河径流变化及其对气候变化与人类活动的响应研究进展[J]. 干旱气象,2013,31(2): 396-405.
- [13] 侯钦磊,白红英,任园园,等. 50 年来渭河干流径流变化及其驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(8): 1505-1512.
- [14] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流的影响[J]. 中国水土保持科学,2013,11(2): 33-38.
- [15] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等. 人类活动对泾河流域径流时空变化的影响[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(6): 66-72.
- [16] 张淑兰. 土地利用和气候变化对流域水文过程影响的定量评价[D]. 北京:中国林业科学研究院,2011.
- [17] Wang Y H, Yu P T, Feger K H, *et al.* Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China [J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 277-287.
- [18] 刘昌明,钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J]. 地理学报,1978,33(2): 112-127.
- [19] Krysanova V, Wechsung F. SWIM (Soil and Water Integrated Model) user manual [M]. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany, 2000.
- [20] Yu P T, Krysanova V, Wang Y H, *et al.*, Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in Northwest China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(2): 2406-2411.
- [21] 熊 伟. 六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2003.
- [22] 徐丽宏,时忠杰,王彦辉,等. 六盘山主要植被类型冠层截留特征[J]. 应用生态学报,2010,21(10): 2487-2493.
- [23] 杜阿朋,何常清,管 伟,等. 六盘山叠叠沟小流域土壤稳渗速率及其影响因子[J]. 林业科学,2009,45(10): 25-31.
- [24] Wang Y H, Yu P T, Xiong X, *et al.* Water yield reduction after afforestation and related processes in the semiarid Liupan Mountains, Northwest China [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1086-1097.

(责任编辑:詹春梅)