

基于遥感的黄土高原林草植被变化 对河川径流的影响分析

刘晓燕¹, 刘昌明², 杨胜天², 金双彦³, 高亚军³, 高云飞⁴

(1. 黄河水利委员会, 郑州 450003;

2. 北京师范大学, 北京 100875;

3. 黄河水文水资源研究院, 郑州 450003;

4. 黄河上中游管理局, 西安 710021)

摘要:从黄土高原不同地貌区降雨产流机制入手, 分析了林草植被影响流域水循环的可能环节; 利用20世纪70年代以来不同时期的土地利用和植被盖度解译成果, 以及同期实测的降雨和径流数据、供用水数据等, 引入林草植被覆盖率、径流系数、产洪系数和基流系数等概念, 从流域尺度上构建了林草植被覆盖率与河川径流的定量响应关系, 结果发现, 在半湿润或半干旱的黄土区, 径流系数和产洪系数都将随林草植被的改善而减少, 气候越干旱、径流或洪量减少越多; 与同气候带的黄土区相比, 盖沙黄土区林草植被改善所导致的减水量更大。不过, 当林草植被覆盖率大于60%后, 产洪系数变化减缓; 最终河川径流将稳定在大于基流的某阈值附近。

关键词:黄土高原; 林草植被; 干旱指数; 河川径流

DOI: 10.11821/dlxb201411001

1 问题的提出

森林植被变化与河川径流的关系一直是生态水文领域的重要研究课题, 欧美学者多认为增加森林覆盖会使径流减少, 前苏联学者则认为增加森林覆盖会使径流增加^[1]。不过, 对地处气候条件偏干旱的黄土高原, “径流深随森林覆盖增加而减少”已成为共识^[1-3], 如刘善建发现子午岭林区的径流模数较周边无林区小25%左右^[4]; 通过在黄龙山林区连续7年的野外观测, 吴钦孝发现中龄油松林的径流量比农地减少84%^[5-6]; 刘向东发现六盘山区森林通过叶茎截留可减水10%~18%, 植物根系因增加降雨入渗而增加潜水蒸发^[7]; 刘昌明发现, 黄土林区的径流系数普遍比非林区小30%~50%^[8], 并指出气候条件是影响森林植被减水与否的重要因素。黄土高原干旱指数变化在0.7~10之间, 如何定量描述不同气候条件下森林植被改善的河川径流响应仍待进一步论证。

黄土高原森林资源有限, 其面积不足黄土高原总面积的10%, 主要是次生混交林, 且主要分布在土石山区、子午岭和黄龙山区一带。在黄土高原的绝大部分地区, 天然植被以灌丛和草地为主, 间有零星人工疏林。关于该区灌草植被与产流的关系, 程积民认为降雨对封育草地补充量可比非封育草地增加35%^[9]; 刘秉正发现, 盖度40%以上的紫花苜蓿、沙棘或沙打旺等灌草地可较坡耕地减水16%~80%^[3]。然而, 此类研究不仅数量少, 而且主要基于径流小区观测数据, 未涉及流域水循环过程中的入渗、蒸散发和汇流环节。因此, 以往对黄土高原林草减水量进行整体评价时, 多采用“林草地面积×耗水定额”进行计

收稿日期: 2014-08-07; 修订日期: 2014-09-09

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2012BAB02B00) [Foundation: National Key Technologies R&D Program, No.2012BAB02B00]

作者简介: 刘晓燕 (1964-), 女, 河南永城人, 教授级高工, 主要从事黄河水沙变化和河流健康研究。

E-mail: liuxiaoyan@yrcc.gov.cn

算^[10],但统计渠道获取的“林草地面积”往往远小于当地林草地的实际规模、且无植被盖度信息,“耗水定额”实际源于一定盖度的人工林草耗水定额,缺乏不同盖度林草在不同气候和土壤条件下的耗水定额;基本未考虑林草植被变化在大中尺度流域层面的响应。

2000年以来,黄土高原地区的林草植被大幅改善^[11-12],同期相应区域的河川径流观测值明显偏少,其中林草改善最突出的河口镇至龙门区间2009-2013年天然径流偏少60%以上。在此背景下,定量评价林草植被变化对黄河天然径流减少的贡献度成为目前的重要生产需求。本文旨在从流域尺度上分析构建黄土高原不同地区林草植被变化与河川径流的响应关系,为定量评价黄土高原林草植被变化对黄河天然径流量的影响提供技术支持。

2 研究区及基础数据

2.1 研究区概况

黄土高原地区泛指祁连山/贺兰山以东、阴山以南、秦岭以北、太行山/管岑山以西的广大地区,面积约64万km²。区内地表物质主要有第四系黄土或黄土状土、半固定或固定沙丘或沙地、土石山区等三大类,尤以黄土分布范围最广(以下称黄土区);沙丘或沙地的沙厚一般在170 m以下、均下伏黄土(不含内流区,下同),简称盖沙区;土石山区多分布在黄土高原周边。本文研究范围为不含内流区的黄河流域黄土区和盖沙区(图1),并重点关注河口镇至潼关区间以及青铜峡至龙羊峡区间,该区干旱指数分别为1.3~4和2~5。

2.2 基础数据的采集与处理

(1) 径流及降雨数据 本文采用的1960-2013年逐日径流数据全部为水文部门实测值。统计与实地调查相结合,获取了相关支流逐年供水量;基于实测径流量,还原用水及

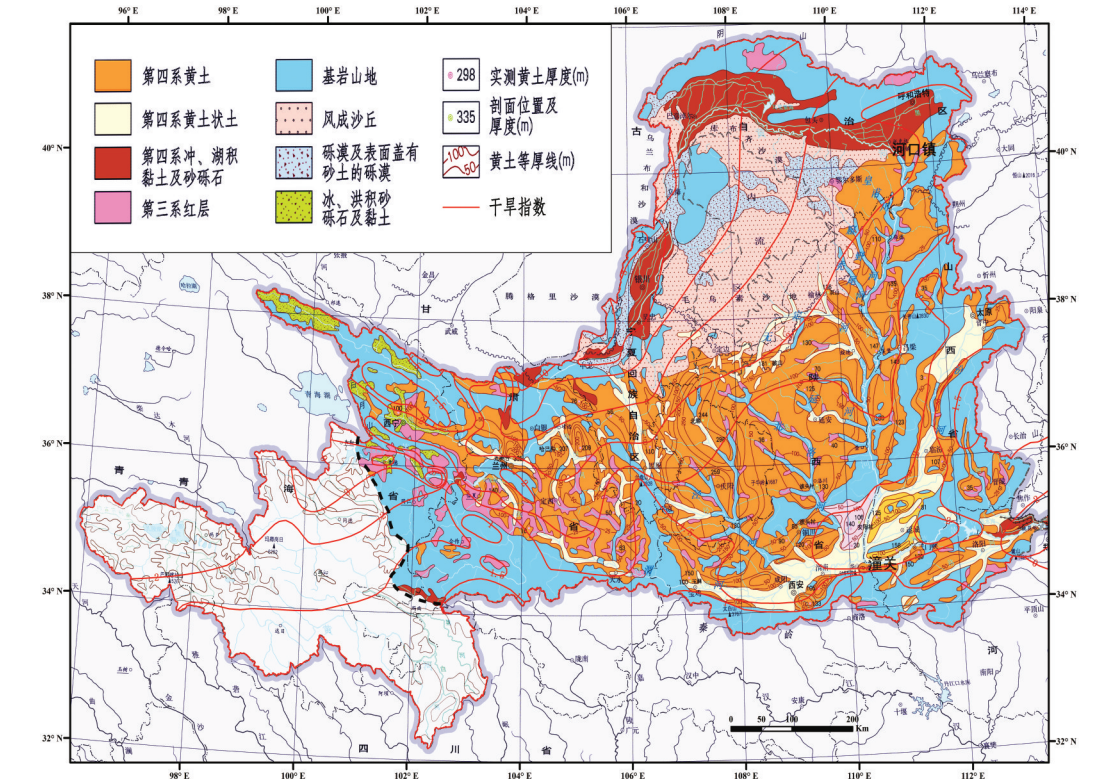


图1 研究区范围图
Fig. 1 Map of the study area

水库蓄变量,得到同期天然径流量。采用枯季径流法切割基流,得到相关支流的逐年洪水水量和基流量。

利用水文部门实测的各雨量站降水数据,计算得到各支流面平均年降水量。大量研究表明,黄土高原大多数降雨并不产流,可能产生径流和洪水的基本上是日降雨大于10 mm和25 mm的大雨^[3],为此,统计了1966-2013年各支流日降雨大于10 mm和25 mm的年雨量,分别用 P_{10} 和 P_{25} 表示。

采用径流系数表征各支流的产水能力,它是年径流深与年降水量的比值,其中年径流深为天然径流量除以相应区域的面积,计算公式为:

$$R_i = \frac{W}{A} \times \frac{1}{P} \tag{1}$$

式中, R_i 为径流系数, W 为天然径流量, A 为流域面积, P 为流域年降水量。

为认识林草植被变化对洪量和基流的影响,分别引入产洪系数和基流系数概念,指一定时段内单位降雨在单位面积上产生的洪水水量或基流量,计算公式分别为:

$$FL_i = \frac{W_f}{A} \times \frac{1}{P_{25}} \tag{2}$$

$$BL_i = \frac{W_b}{A} \times \frac{1}{P} \tag{3}$$

式中, FL_i 为产洪系数, BL_i 为基流系数, W_f 和 W_b 分别为洪水水量和基流量, P 为流域年降水量, P_{25} 为日降雨大于25 mm的年降雨总量。

(2) 林草植被数据 为全面反映林草植被面积和植被盖度等要素较天然时期的变化,仍沿用“林草植被覆盖率”概念^[13],并考虑径流形成特点进行了适当调整,计算公式为:

$$V_e = V_c \times \frac{A_v}{A} \tag{4}$$

式中, V_e 为林草植被覆盖率,单位%; A 为流域面积; A_v 为林草地面积,它是流域内林地、草地和未利用土地面积之和; V_c 是林草地的植被盖度,是林草叶茎正投影面积占林草地面积 A_v 的比例。由此可见,林草植被覆盖率反映的是林草叶茎对全流域的覆盖程度,而林草植被盖度反映的是林草叶茎对林草地的覆盖程度,二者的核心区别在于被覆盖对象的空间尺度。

林草地面积和植被盖度信息均须从遥感影像提取。采用的遥感影像有四个时段:70年代末(MSS,空间分辨率56 m,主要为1977年和1978年影像)、90年代末(TM,空间分辨率30 m,主要为1998年影像)、2010年和2013年(HJ,空间分辨率30 m)。基于遥感影像,并结合实地调查,进行土地利用类型分析,可得到各支流的林地、草地和未利用土地面积,合计称为林草地面积。提取流域的植被归一化指数(NDVI),反演植被盖度^[14],并将流域内耕地和建设用地的植被盖度赋值为0,即可计算出“林草地”的植被盖度。

3 林草植被变化对年径流量的影响

对闭合流域,其多年平均的水量平衡方程可表示为:

$$R = P - E \tag{5}$$

式中, R 为径流量, P 为降雨量, E 为陆面蒸发量。分析上式可见,在一定降雨条件下,黄土高原地区实际的陆面蒸发量是决定河川径流大小的关键因素,而影响陆面蒸发的因素包括地表物质组成、干旱条件和植被状况等。

林草植被变化对河川径流的影响主要通过两个途径,一是通过叶茎和枯落物截留降雨,进而可能影响陆面蒸腾,其量值与地表物质组成基本无关,但却受当地气候条件影

响、并与植被类型有关；二是植物根系使土壤持水量增加、持水时间延长，进而可能影响潜水蒸发和植物蒸腾的数量，其值不仅与气候条件有关，而且深受地表物质组成影响。因此，以下将区分不同气候和地表物质组成，分析林草植被变化对河川径流的影响。

3.1 黄土区

在半湿润或半干旱的黄土区，巨厚的包气带缺水量很大，很难产生重力水。事实上，由于植被生长会吸收土壤水，往往导致该区深层土壤干化^[15]。因此，早在 60 年代初，刘昌明就指出，广大黄土地区的径流形成无疑是超渗产流方式^[16]，后被广泛认可。裸露黄土区潜水的极限蒸发深度一般在 4 m 左右。

研究区的黄土区主要分布在干旱指数为 1.3 以上的半湿润或半干旱地区。在此类地区，增加植被盖度显然将增大叶面蒸腾；该区天然草地的根系深度一般在 1 m 以内、乔木根系可达 5~10 m，因此，改善林草植被不仅会增加土壤水吸收，而且蒸散发的影响深度可能会超过裸露黄土区潜水的极限蒸发深度，从而增加蒸散发量。因此，此类地区改善林草植被必将增加陆面蒸散发、减少河川径流。

为剔除地形和气温影响，选择梯田极少年代黄土丘陵区支流，获取其 20 世纪 60-80 年代的实测径流量、供水量、降雨量、水面蒸发量和林草植被数据，计算出相应时期的干旱指数、径流系数和林草植被覆盖率。然后，区分不同干旱指数，分别

点绘径流系数与林草植被覆盖率的关系 (图 2)，图中干旱指数为 1.5~2.1 的支流数据来自清涧河以南的黄土丘陵区，干旱指数约为 2.4 的支流数据来自无定河中下游和佳芦河等，干旱指数为 2.9~3.1 的数据来自皇甫川、清水川和孤山川。由图可见：在相同气候背景 (水热条件) 下，林草植被覆盖率越大，流域径流系数或产水率越小；在选用数据范围内，二者几乎呈负相关的直线关系；相同林草植被状况下，气候越干旱，不仅产水越少、而且产水

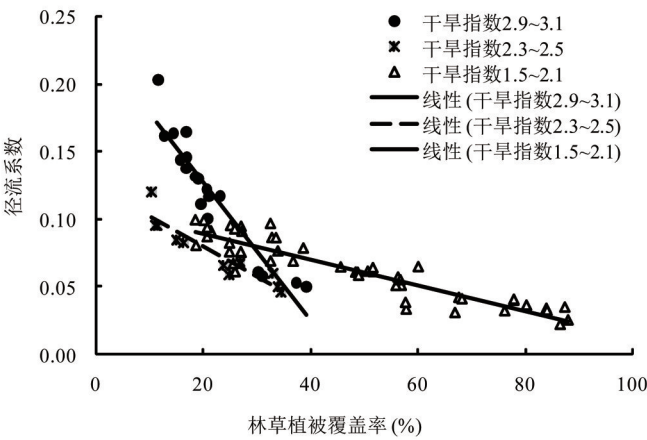


图2 黄土高原林草植被覆盖率与径流系数的关系
Fig. 2 Relationship between the effective vegetation percentage and the runoff yield coefficient in the Loess Plateau

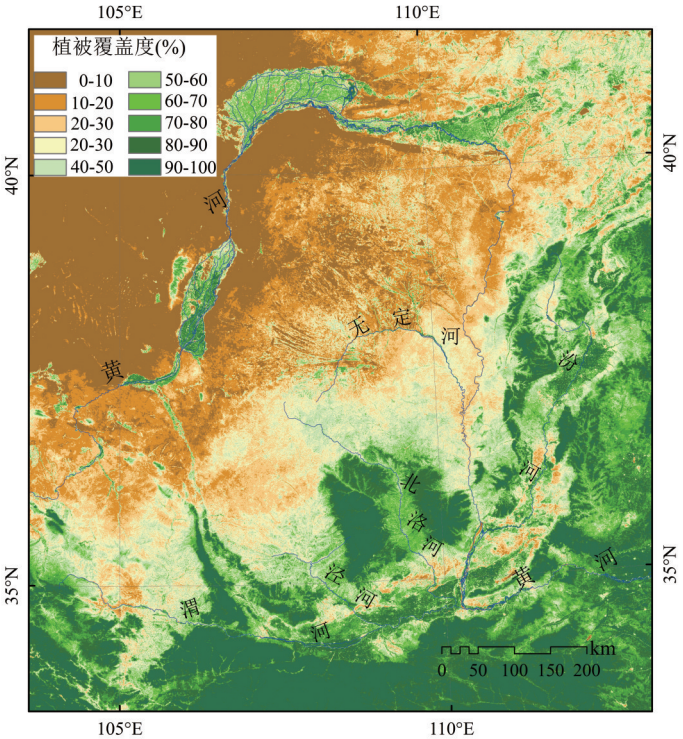


图3 黄土高原植被盖度图
Fig. 3 The vegetation coverage in the Loess Plateau

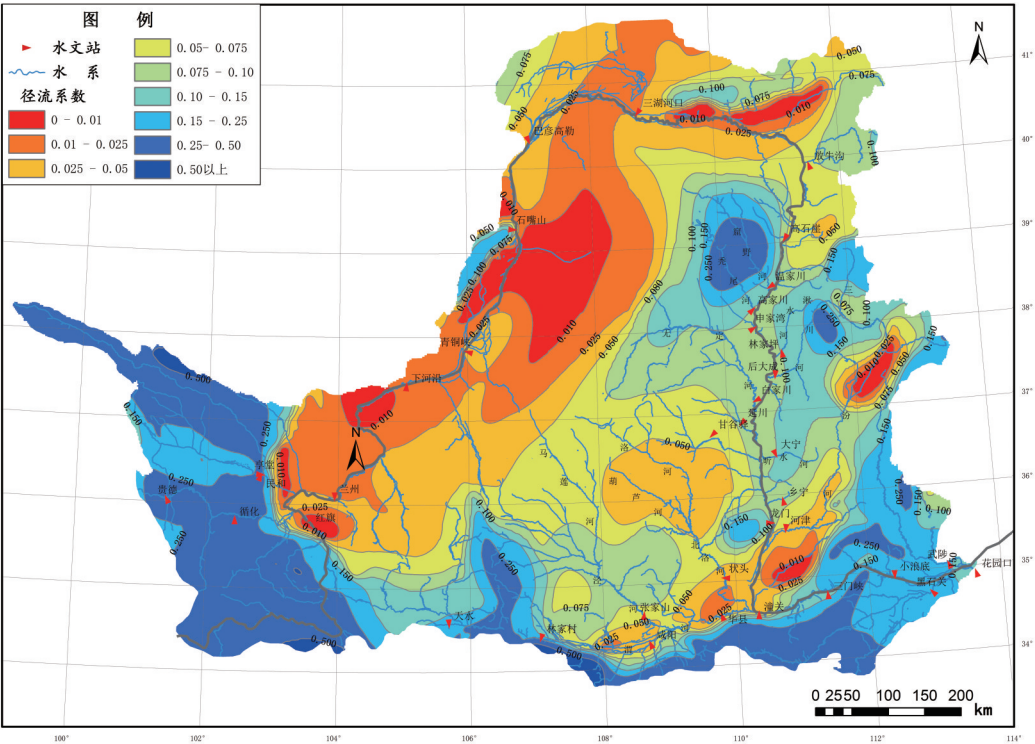


图4 黄土高原径流系数等值线图

Fig. 4 The runoff yield coefficient isoline in the Loess Plateau

量对植被变化更敏感。该认识与刘昌明基于黄土林区支流得到的结论一致^[8]。

实际情况也是如此。北洛河中游的子午岭和黄龙山次生林区是黄土高原植被状况最好的地区之一(图3),而由黄土高原径流系数等值线可见,该区恰是黄土区径流系数的低值区(图4,基于1956-2000年黄河水资源评价成果绘制)。

理论上,高大乔木的蒸散发量大于灌木和草地,尤其在较干旱地区,林木根系往往更深,比灌木和草本植物更容易吸收更深层次的水分,所以蒸散发量应更大^[2]。实际上,乔木林主要生长在气候相对湿润的延安以南地区、该区植被增加的减水率相对较小,因此在目前植被已达次生林水平的云岩河临镇以上和北洛河的葫芦河流域,其林草植被覆盖率—径流系数关系与灌草区并无明显区别(图5)。

以上分析表明,在干旱指数为1.5~3.1的黄土区,增加林草植被均将减少河川径流;在上图所选数据范围内,流域尺度上林草植被覆盖率与径流系数之间呈负相关的直线关系:

$$R_i = \alpha - \beta \cdot V_e \tag{6}$$

式中, R_i 是径流系数; α 和 β 均是气候条件有关的系数,其取值与当地水热条件(即干旱指数)有关; V_e 是林草植被覆盖率。对应干旱指数1.5~2.1、2.4左右和2.9~3.1, α 分别为0.1082、0.124和0.2297, β 分别为0.0009、0.0022和0.0051。计算出不同时期的径流系数,即可得到林草植被减少

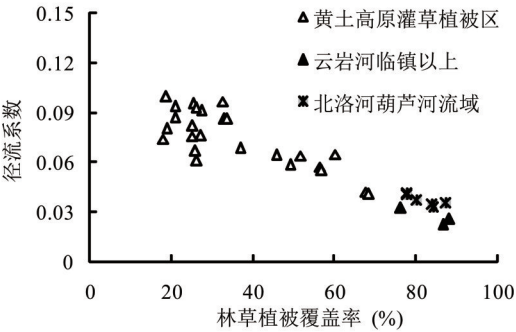


图5 黄土高原不同植被类型区植被变化对产水的影响

Fig. 5 Influence of vegetation coverage type on the runoff yield in the Loess Plateau

或增加所导致的河川径流增减量。分析 β 值的变化可见，在干旱指数1.5~2.1的地区，林草植被覆盖率每增加1个百分点，径流系数可下降0.0009；而在干旱指数为2.9~3.1的地区，林草植被覆盖率每增量1个百分点，径流系数下降0.0051，该降幅较“干旱指数为1.5~2.1的地区”大4.7倍。

图2和图5计算径流系数采用的降雨因子均为年降雨量。分别采用P和 P_{10} 作为降雨因子，比较了不同干旱条件下径流系数，结果发现：在干旱指数大于2.4的地区，以 P_{10} 作为降雨因子的径流系数~林草覆盖率关系的相关程度可提高5%~10%，说明该区的产流降雨主要是日降水大于10 mm的降雨，这与王万忠基于绥德和子洲等地的观测结论基本一致^[17]。而在干旱指数小于2.1的地区，以P作为降雨因子的径流系数—林草覆盖率关系的相关程度更高，说明10 mm以下降雨也是此类地区的产流降雨。

本项目遥感调查表明，黄河河口镇—龙门区间、北洛河上游和汾河流域是近年林草植被改善或增加最突出的地区。20世纪70年代以前，其黄土地区的林草植被覆盖率分别为25.4%、24.3%和41.6%，2013年分别达到46%、53%和57%。逐支流计算表明，由此导致的河川径流减少量合计约13.06亿 m^3 ，占相应区域天然径流量的30%。

3.2 盖沙区

与黄土区不同，盖沙区的产流模式更倾向于蓄满产流。表层的松散风积沙为本区的浅层地下水含水层；沙区均下伏离石黄土或三趾马红土，为本区隔水层。盖沙区由于孔隙率大、渗透系数远大于黄土或红土，故盖沙区的降雨基本入渗，且大多表现为重力水，或侧渗排向河道、或抵达隔水层后排向河道。由于毛细水极少，盖沙区潜水的极限蒸发深度一般只有2 m。

秃尾河流域高家堡以上的风积沙厚度一般在10~20 m、局部洼地达40 m以上，窟野河中游(指神木—转龙湾/新庙区间)风积沙厚度不足5 m、局部20 m^[18]，两区干旱指数分别为2.5和3。点绘两支流不同时期的林草植被覆盖率和径流系数关系，并与黄土区对比可见(图6，计算径流系数采用的降雨因子均为 P_{10})，在相同植被状况下，盖沙区的径流系数远大于黄土区，这与实际情况非常一致(图4)；尽管干旱指数较小，秃尾河上游关系线的斜率却与干旱指数为2.9~3.1的黄土区接近。

秃尾河高家堡以上面积20.95万 hm^2 ，多年平均 P_{10} 为224.7 mm、天然径流量3.02亿 m^3 。按图6，该区林草植被覆盖率每增加1个百分点，径流系数将下降0.0104，折合每1 hm^2 减水4.9 m^3 。而在盖沙厚度较小的窟野河中游，林草植被覆盖率每增加1个百分点，径流系数将下降0.0096，折合每1 hm^2 减水4.5 m^3 。

据相关研究，为更多吸收水分，该区沙生植物的根系更深^[19]，一般在3~5 m、乔木可达10 m，而黄土地区草被根系一般在1 m以内、灌木可达1~2 m，这可能是盖沙区改善植被的耗水量更大的原因。显然，植被根系对土壤水蒸散发的影响主要发生在根系延伸的范围内。风积沙厚度越大，降雨—入渗—汇流的路径越长。风积沙厚度大于植物的最大根系深度后，相同覆盖率的单位面积植被耗水应趋于定值。

无定河上游风沙区的盖沙厚度

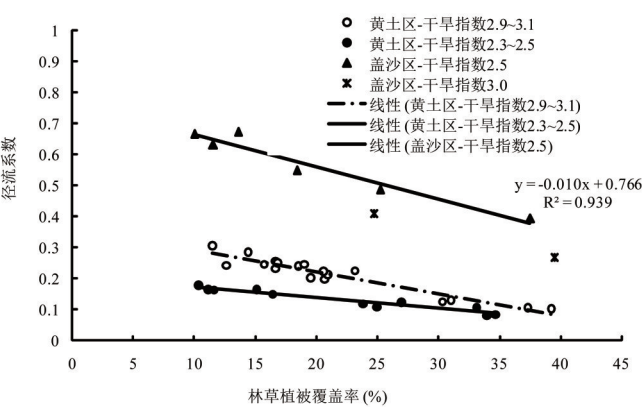


图6 黄土高原盖沙黄土区林草植被变化对径流的影响
Fig. 6 Influence of the shrubs-herbs-arbor vegetation on the runoff in the sand-covered loess area in the Loess Plateau

达10~170 m, 大于沙生植被根系吸水的作用范围, 且干旱指数与秃尾河高家堡以上相近, 故可参考“林草植被覆盖率每增1个百分点、流域减水4.7 m³/hm²”测算其林草植被减水量。以无定河上游的海流兔河为例, 该河流域面积24.52万hm²、多年平均天然径流量9683万m³、林草植被覆盖率从70年代末的15.7%增加至2013年的38.5%, 计算的2013年减水量应为2628万m³、占天然径流量的27.1%, 实际减水2580万方, 计算值与实测值基本吻合。

本项目遥感调查表明, 20世纪70年代以前, 黄河河口镇—龙门区间盖沙区的林草植被覆盖率为14.5%, 2013年达到39%。逐支流计算表明, 由此导致的河川径流减少量合计4.633亿m³, 占相应区域天然径流量的32.4%。

4 林草植被变化对洪水和基流的影响

在黄土高原, 改善森林植被对削减洪峰和洪量作用已经成为共识^[2-3, 20-22]。在图2支流中选择洪量和基流数据更可靠的支流, 分别点绘林草植被覆盖率与产洪系数、基流系数的关系(图7, 图8)。

由图7可见, 无论干旱条件如何, 产洪系数均随林草植被覆盖率的增加而减小, 二者大体呈乘幂关系, 与林草植被覆盖率—产沙系数的关系型式基本呼应^[13]; 林草植被覆盖率大于60%后产洪系数趋于稳定, 但仍有一定量级, 这与林草植被覆盖率—产沙系数的关系不同, 说明改善林草植被可基本遏制侵蚀、但难以消灭洪水。

基于图8, 在干旱指数为1.5~2.1的地区, 基流系数随林草植被覆盖率增加而略有增加, 即改善植被将增加河道基流。不过, 在干旱指数大于2.5的区域内, 因风积沙或岩溶基岩的影响, 致使可利用的支流数据偏少, 尚不能得出趋势性结论。

对比图7和图8可见, 由于增加林草可能会略增基流、且不能消灭洪水, 故随林草植被增加所致的河川径流减少不会无限发展。如果没有人类用水, 林草植被改善后的河川径流最终将稳定在大于基流的某个阈值附近。

5 结论

- (1) 在气候条件较干旱的黄土高原, 通过对降水的截留、促渗、吸收和蒸腾等途径, 植被变化一般将改变河川径流量, 但改变程度取决于地表物质组成和气候条件。
- (2) 在地表物质为黄土的地区, 改善植被必将导致河川径流减少; 气候越干旱, 改善

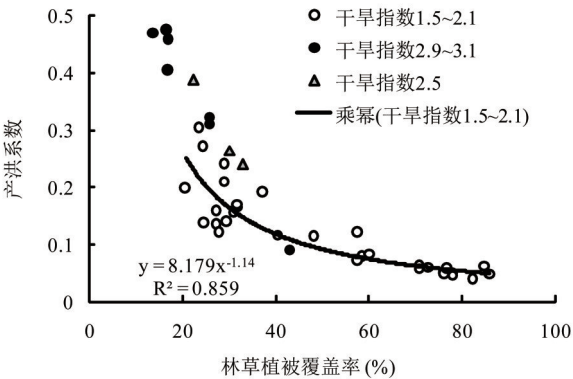


图7 黄土高原林草植被变化对洪水的影响
Fig. 7 Influence of the shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the flood yield in the Loess Plateau

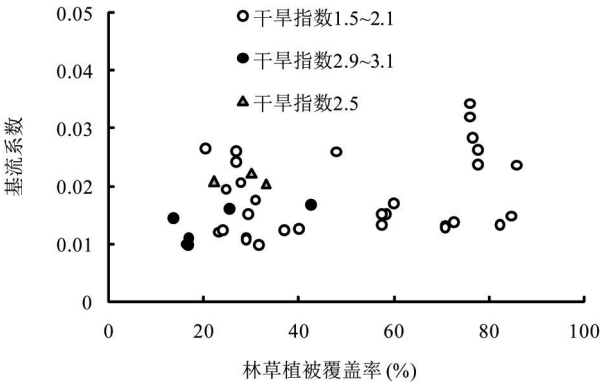


图8 黄土高原林草植被变化对基流的影响
Fig. 8 Influence of the shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the base flow yield in the Loess Plateau

植被的减水量越大。在干旱指数分别为1.5~2.1和2.9~3.1的地区,在1970s迄今的林草植被变化范围内,林草植被覆盖率每增加1个百分点,径流系数可分别下降0.0009和0.0051,即林草植被在干旱地区的减水量远大于半湿润区。

改善林草植被将明显消减洪量,但林草覆盖率大于60%以后产洪系数将稳定在一定量值。在半湿润的南部黄土区,改善林草植被将使基流略有增加。

(3) 在黄河中游的盖沙区,改善植被不仅大幅减水、而且减幅高于相近气候条件的黄土区。在风积沙厚度大于10 m的盖沙区,林草植被覆盖率每增加1个百分点、流域将减水4.7 m³/hm²。

(4) 2013年,黄河河口镇—龙门区间的黄土区和风沙区、北洛河上游和汾河流域的林草植被覆盖率分别由70年代以前的25.4%、14.5%、24.3%和41.6%增加到46%、39%、53%和57%,由此导致的减水量合计约17.8亿m³。如果未来继续推行退耕还林(草)和封山禁牧政策,且不考虑用水等其他因素减水,则以上地区的河川径流将稳定在某个大于基流的阈值附近。

参考文献 (References)

- [1] Li Yuanhua, He Yongtao, Yang Liyun. A summary and perspective of forest vegetation impact on water yield. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 398-406. [李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 398-406.]
- [2] Chen Junfeng, Li Xiubin. The impact of forest change on watershed hydrology-discussing some controversies on forest hydrology. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 474-480. [陈军峰, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 474-480.]
- [3] Tang Keli. *The Soil and Water Conservation in China*. Beijing: Science Press, 2004: 60-66. [唐克丽. *中国水土保持*. 北京: 科学出版社, 2004: 60-66.]
- [4] Liu Shanjian. The impact of forest on hydrology and rivers. *Yellow River*, 1984, (3): 2-7. [刘善建. 从对比分析看森林对水文和河流的影响. *人民黄河*, 1984, (3): 2-7.]
- [5] Wu Qinxiao, Zhao Hongyan. Effectiveness of forest litter to soil and water conservation. *Journal of Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forest*, 2001, 29(5): 96-98. [吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性. *西北农林科技大学学报*, 2001, 29(5): 96-98.]
- [6] Wu Qinxiao, Zhao Hongyan. Evaluation on role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 23-28. [吴钦孝, 赵鸿雁. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 23-28.]
- [7] Liu Xiangdong, Su Ninghu, Wu Qinxiao. An evaluation on hydro-ecological function of forest in the Liupanshan Mountain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(1): 90-97. [刘向东, 苏宁虎, 吴钦孝. 六盘山森林保持水土生态功能评价. *水土保持学报*, 1987, 1(1): 90-97.]
- [8] Liu Changming, Zhong Junxiang. The influence of forest cover upon annual runoff in the Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 1978, 33(2): 112-127. [刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流量影响的初步分析. *地理学报*, 1978, 33(2): 112-127.]
- [9] Cheng Jimin. Soil water regulation of the natural grassland of semi-arid loess hilly region. *Acta Agrestia Sinica*, 2003, 11(4): 296-300. [程积民. 黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水份调控作用. *草地学报*, 2003, 11(4): 296-300.]
- [10] Ran Dachuan, Zuo Zhongguo, Wu Yonghong et al. *The Response of Human Activities on the Water-Sediment-Change in the Middle Yellow River*. Beijing: Science Press, 2012: 99-128. [冉大川, 左仲国, 吴永红 等. *黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应*. 北京: 科学出版社, 2012: 99-128.]
- [11] Zhou Xu, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan. Characteristics of soil and water conservation measures change in the watershed slope of the middle Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 64-72. [周旭, 杨胜天, 刘晓燕. 黄河中游多沙粗沙区流域坡面水保措施变化特征. *地理学报*, 2014, 69(1): 64-72.]
- [12] Luo Ya, Yang Shengtian, Liu Xiaoyan. Land use change in the reach from Hekouzhen to Tongguan of the Yellow River during 1998-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 64-72. [罗娅, 杨胜天, 刘晓燕. 黄河河口镇—潼关区间1998-2010年土地利用变化特征. *地理学报*, 2014, 69(1): 42-53.]
- [13] Liu Xiaoyan, Yang Shengtian, Jin Shuangyan. The method to evaluate the sediment reduction from forest and grass land over large area in the loess hilly area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(2): 135-141. [刘晓燕, 杨胜天, 金双彦. 黄土丘陵沟壑区大空间尺度林草植被减沙计算方法研究. *水利学报*, 2014, 45(2): 135-141.]
- [14] Toby N Carlson, David A. Ripley. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index.

- Remote Sens. Environ., 1997, 62: 241-252.
- [15] Li Yushan. The properties of water cycle in soil and their effective on water cycle for land in the loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91-101. [李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.]
- [16] Liu Changming, Hong Baoxin. The relation between rainstorm and runoff in Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1965, 2(1): 158-161. [刘昌明, 洪宝鑫. 黄土高原暴雨径流预报关系初步实验研究. *科学通报*, 1965, 2(1): 158-161.]
- [17] Wang Wanzhong. Study on the relation between rainfall characteristic and loss of soil in loess region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984, 2: 59-63. [王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 III: 关于侵蚀性降雨的标准问题. *水土保持通报*, 1984, 2: 59-63.]
- [18] Wang Tong. Yulin-Shenmu-Fugu mining area mine hydrogeological condition categorizing. *Coal Geology of China*, 2010, 23(1): 21-24. [王佟. 榆神府区矿井水文地质条件分类研究. *中国煤炭地质*, 2010, 23(1): 21-24.]
- [19] Wang Shuangming, Huang Qingheng, Fan Limin et al. *Coal Mining and Ecological Water Level Protection in Ecologically Fragile Areas*. Beijing: Science Press, 2010: 84-96. [王双明, 黄庆亨, 范立民 等. *生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护*. 北京: 科学出版社, 2010: 84-96.]
- [20] Lan Yuedong, Kang Lingling. Effects of forest vegetation and ecological recovery of small watershed on water and sediment variations. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(1): 35-38. [兰跃东, 康玲玲. 森林植被和小流域生态修复对水沙变化的影响研究. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 35-38.]
- [21] Sun Ge. The forest's on the runoff and the research methods. *The Research of Land and Natural Resources*, 1987, (2): 67-71. [孙阁. 森林对河川径流影响及其研究方法的探讨. *国土与自然资源研究*, 1987, (2): 67-71.]
- [22] Wang Qinghua, Li Hua'en, Lu Kefeng et al. Analysis of affective of forest vegetation change on watershed runoff and flood. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2004, 15(2): 21-23. [王清华, 李怀恩, 卢科锋 等. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析. *水资源与水工程学报*, 2004, 15(2): 21-23.]

Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau

LIU Xiaoyan¹, LIU Changming², YANG Shengtian²,

JIN Shuangyan³, GAO Yajun³, GAO Yunfei⁴

(1. *Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;*

2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Yellow River Institute of Hydrology and Water Resources, Zhengzhou 450004, China;

4. Upper and Middle Reaches of the Yellow River Administrative Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Xi'an 710021, China)

Abstract: The impact of vegetation coverage on flood or runoff yield in the Loess Plateau has been extensively studied, but the research has been primarily based on observations from slope runoff plots or secondary forest regions. This paper is based on vegetation information from remote sensing images, measured rainfall and runoff data and water consumed from the related basin in Loess Plateau over nearly 50 years. By introducing the concepts of runoff yield coefficient, flood yield coefficient, base flow yield coefficient, and the percentage of effective vegetation, we proposed the quantitative relation between vegetation coverage extracted from remote sensing images and runoff yield at the watershed scale. The response relations reveal that the runoff yield and flood volume will decrease with the increase of shrubs-herbs-arbor vegetation, especially in the dryer region, and the reduction of the runoff in sand-covered loess region is even more than that in the loess region with similar climate. But the flood volume will be kept at a stable level, when the percentage of effective vegetation is larger than 60%. The river's runoff will be stable at a threshold, which is more than its base-flow at last, with a further increase of vegetation.

Key words: Loess Plateau; shrubs-herbs-arbor vegetation; drought index; runoff yield