

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.030

黄土高原典型区雨水资源化潜力模拟与评价

高学睿^{1,2} 闫程晟^{2,3} 王玉宝^{2,3} 赵西宁^{1,2} 赵旗² 吴普特²

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为充分利用雨水资源应对黄土高原水土流失和干旱缺水的问题, 引入分布式水文模拟技术, 构建具有物理成因机制的分布式雨水资源化潜力评估模型, 解决雨水资源利用的核心问题——评价当地的雨水资源化潜力。通过研究黄土高原典型区域黄河河口镇至龙门段(河龙区间) 的雨水资源情况, 定量评估该区域雨水资源化潜力, 结果表明: 在气候变化和人类活动的双重背景下, 20世纪80年代后, 黄河流域河龙区间的地表径流量、土壤有效水增量和雨水资源化潜力呈现上升趋势; 河龙区间大部分地区雨水资源呈增长趋势, 雨水资源可基本满足现有条件下区域植被恢复的用水需求。气候变化对雨水资源化潜力起正影响作用, 贡献率为63.4%, 土地利用/覆盖变化则为负影响, 贡献率为-36.6%。人类活动对区域雨水资源利用的影响不容忽视, 应大力发展干旱半干旱区降雨-径流调控技术, 提高雨水资源化利用率, 以保障区域生态-经济协同可持续发展。

关键词: 黄土高原; 雨水利用; 退耕还林还草; 雨水资源化潜力; 分布式水文模型

中图分类号: P333.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0275-09

OSID:



Simulation and Evaluation of Rainwater Harvesting Potential in Typical Areas of Loess Plateau

GAO Xuerui^{1,2} YAN Chengsheng^{2,3} WANG Yubao^{2,3} ZHAO Xining^{1,2} ZHAO Qi² WU Pute²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The rational use of rainwater resources can not only reduce the source of soil erosion, but also provide effective water supply to the local area. The Loess Plateau has less precipitation, large evaporation, and very scarce surface water resources. Therefore, the use of rainwater resources has become an important means for the Loess Plateau to deal with soil erosion, drought and water shortage. The core issue of rainwater resource utilization is to scientifically evaluate the local rainwater resource potential and its spatial and temporal distribution. For this reason, the distributed hydrological simulation technology was introduced to construct a distributed rainwater harvesting potential assessment model. It was dedicated to solving the core problems of rainwater resource utilization and evaluate the potential of local rainwater resources. The following conclusions were drawn by studying the typical Helong Region of the Loess Plateau. Under the dual influences of climate change and human activities, the surface runoff, soil water increment and the rainwater harvesting potential in Helong Region showed an upward trend after 1980s. The rainwater resources of most sub-basins in the Helong Region had a growing trend, and the rainwater resources could basically meet the water consumption under the current vegetation coverage. Climate change had a positive impact on rainwater resources with the contribution rate of 63.4% and the land use/cover change had a negative impact with the contribution rate of -36.6%. Therefore, the human activities imposed great effect on rainwater utilization pattern, and to fully develop the rainfall-runoff regulation technologies and improve the rainwater using efficiency were the key countermeasures to

收稿日期: 2019-04-09 修回日期: 2019-08-13

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306)和国家重点研发计划项目(2018YFF0215702)

作者简介: 高学睿(1986—),男,副研究员,博士,主要从事流域水循环模拟和水资源管理研究, E-mail: gaoxr@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 王玉宝(1975—),男,研究员,博士,主要从事农业水资源高效利用研究, E-mail: wyb0406@sina.com

realize the ecology-economy synergetic development in the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; rainwater utilization; returning farmland to forests and grassland; rainwater harvesting potential; distributed hydrological model

0 引言

干旱缺水 and 水土流失是制约黄土高原经济发展和生态环境可持续发展的重要因素^[1]。黄土高原降水少、蒸发大,地表水资源十分匮乏^[2],深厚黄土层所形成较深的包气带使得地下水埋藏较深^[3-4]。雨水资源的高效利用是有效应对黄土高原水资源匮乏问题唯一可行的技术手段^[5-6]。目前,黄土高原地区雨水资源化的调控技术侧重于点尺度技术研发推广,且已较为成熟,如动力拦截技术、就地入渗技术、径流蓄存技术以及集蓄灌溉技术等^[7-8]。而针对大尺度雨水资源利用潜力的评估研究还很薄弱^[9]。雨水资源化潜力指数是有效、准确评价区域雨水资源的方法之一。冯浩等^[10]认为,雨水资源化潜力可以分成3个层次:①理论潜力,即降落到研究区的雨水资源总量。②现实潜力,即现有雨水利用技术条件下已被利用的雨水资源量。③可以实现的潜力,即流域内可达到的最大雨水资源使用量以及现实潜力。ZHAO等^[11]认为,由于黄土高原深厚的包气带,地下水既难以得到补充,也难以被开发利用,所以黄土高原地区雨水资源化潜力可以不包括地下水增量部分。高晓东等^[12]从黄土高原小流域的土壤水时空变异角度出发,通过数理统计手段评价黄土丘陵区小流域的雨水资源化潜力,但小流域的评价方法难以在大流域直接使用。ZHANG等^[8]首次将分布式水文模型VIC模型应用到黄土高原,并按照50 km×50 km的空间单元计算黄土高原地区的雨水资源化潜力,从而实现了研究区雨水资源化潜力空间分布和时间变化规律的量化分析。但上述研究空间分辨率过大,因此导致雨水资源化潜力的模拟精度不理想。

在气候变化和下垫面变化的共同影响下,气象和水文要素的时空分布规律均发生了较大变化^[13-15],即气候变化和人类活动对自然水文过程产生较大影响。而目前雨水资源化潜力的评估方式和工具还不完善,建立适用于变化环境下的雨水资源化潜力计算方法和模型工具具有重要意义^[16-17]。本文引入分布式水文模型,以自然流域为基本计算单元,提高模型的空间分辨率,构建适用于黄土高原地区、具有物理成因机制的分布式雨水资源化潜力评估模型,定量评估区域雨水资源化潜力,为开展变化环境下黄土高原雨水资源高效利用提供坚实的技

术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

黄土高原地处内陆,全区面积约为64万km²。全域大部分区域覆盖深厚的黄土层,最厚处达200 m以上,是世界著名的干旱区和水土流失区^[9]。其中黄河河口镇至龙门段(河龙区间)坐落于黄河流域中部,东西窄南北长^[18],属于黄土高原典型的沟壑丘陵区,面积约11.2万km²,是黄土高原水土流失最为严重的区域之一^[19]。河龙区间包含延安市、榆林市、吕梁市等行政区,农林业较发达,高效的雨水资源利用、各项水土保持措施极大地改变了区域下垫面^[7]。黄土高原河龙区间的空间分布如图1所示。

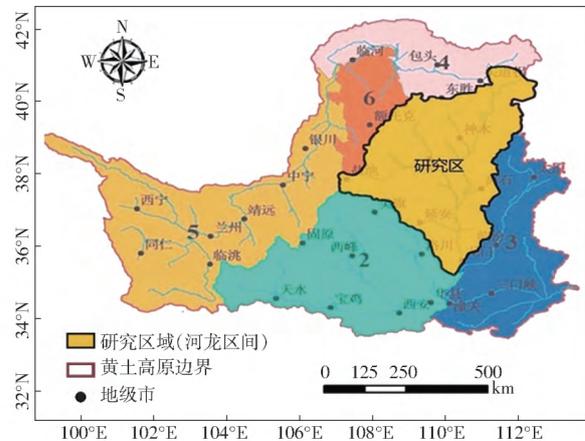


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

1.2 雨水资源化潜力计算方法

雨水资源的高效利用是缓解黄土高原干旱缺水和水土流失的关键所在,而雨水资源化潜力的定量评估是高效利用当地雨水资源的关键。对于一般地区而言,雨水资源总量应为全部降水量,而雨水资源化潜力应包含由降水经下垫面再分配过程转换而来的地表径流、土壤有效水和地下水3部分。然而,黄土高原农业用水主要以降水补给为主,井灌面积较小,并且降水向地下水的补给水分微弱,目前针对黄土高原雨水资源化潜力的内涵和组成已经达成了基本共识^[5],即雨水资源化潜力主要由一定时间段内由降水产生的地表径流和下垫面土壤有效水的增量两部分组成,因此对雨水资源化潜力计算中可以不重点考虑地下水^[8]。通过以上分析表明,黄土高原

雨水资源化潜力应为每次降水后所产生的地表径流和下渗到土壤的有效水含量之和^[11 20-21], 公式为

$$\Delta S = \begin{cases} S_e - S_s & (\Delta S > 0) \\ 0 & (\Delta S \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

式中 ΔS ——每次降水事件后土壤有效水净增量, mm

S_s ——降雨事件开始前土壤有效水含量, mm

S_e ——降水事件结束后土壤有效水含量, mm

$$P = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (R_{ij} + \Delta S_{ij}) \quad (2)$$

式中 P ——雨水资源化潜力, mm

R ——地表径流量, mm

i ——降水事件次序 j ——子流域编号

m ——研究时段内降水的次数

n ——研究区子流域数量

1.3 基于分布式水文模型的雨水资源化潜力计算

本研究所采用的水文模型是由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度的半分布式水文模型(Soil water assessment tool, SWAT)^[22]。该模型基于物理过程对水流验算、泥沙运移等过程进行模拟,具有运算效率高、可以连续长时间模拟等优点^[23]。在构建 SWAT 分布式水文模型过程中,本研究需收集的数据如表 1 所示。根据表 1 资料建立 SWAT 模型,所建立的 SWAT 模型可以在水文响应单元以及子流域两个空间尺度上输出土壤有效水含量以及地表径流量,根据式(1)和式(2)计算出各子流域上的土壤有效水净增量以及雨水资源化潜力。

表 1 河龙区间数据资料清单

Tab.1 Data of Helong region

数据名称	数据来源	数据说明
数字高程(DEM)	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)	数据分辨率为 30 m × 30 m
气象	中国气象数据网(http://data.cma.cn/)	区域内气象站点 1970—2015 年日观测数据
土地利用/覆盖	国家科技基础条件平台(http://www.geodata.cn)	Landsat TM/ETM 遥感影像解译的 1 km 栅格数据
土壤	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)	中国土壤类型空间分布数据集 1 km 栅格数据
水文	黄河水利委员会《黄河流域水文资料》	多个代表性的水文站点 1980—2015 年日观测数据
归一化植被指数(NDVI)	国家科技基础条件平台(http://www.geodata.cn)	数据分辨率为 500 m × 500 m

1.4 雨水资源化潜力变化的贡献率分析方法

为了进一步探索影响河龙区间雨水资源的主要因素是气候变化还是人类活动,区分气候变化和土地利用/覆盖变化对研究区雨水资源化潜力的影响贡献率,本研究设置 3 种情景:①以退耕还林(草)工程实施年份(1999 年)为界,定义 1980—1999 年为基准情景(S1),代表雨水资源化潜力的历史平均水平,利用 1980 年的土地利用/覆盖和 1980—1999 年的气象数据驱动水文模型。②将变化情景 1(S2)定义为黄土高原退耕还林(草)之后气候发生变化,而土地利用没发生变化的假设情景,以 1980 年的土地利用/覆盖和 2001—2015 年的气象数据驱动水文模型。③将变化情景 2(S3)定义为黄土高原退耕还林(草)之后气候发生变化,土地利用/覆盖也发生变化的情景,以 2010 年的土地利用/覆盖和 2001—2015 年的气象观测数据驱动水文模型。

在此基础上,研究区气候变化和土地利用对雨水资源化潜力的影响贡献率的量化公式为

$$\Delta P_L = P_{S3} - P_{S2} \quad (3)$$

$$\Delta P_C = P_{S2} - P_{S1} \quad (4)$$

$$\Delta P = |\Delta P_L| + |\Delta P_C| \quad (5)$$

$$\mu_L = \frac{|\Delta P_L|}{\Delta P} \times 100\% \quad (6)$$

$$\mu_C = \frac{|\Delta P_C|}{\Delta P} \times 100\% \quad (7)$$

式中 ΔP_L ——雨水资源化潜力受土地利用影响的变化量, mm

ΔP_C ——雨水资源化潜力受气候变化影响的变化量, mm

P_{S1} ——S1 情景下多年的平均雨水资源化潜力, mm

P_{S2} ——S2 情景下多年的平均雨水资源化潜力, mm

P_{S3} ——S3 情景下多年的平均雨水资源化潜力, mm

ΔP ——雨水资源化潜力变化总量, mm

μ_L ——土地利用变化对雨水资源化潜力变化的影响贡献率, %

μ_C ——气候变化对雨水资源化潜力变化的影响贡献率, %

1.5 Mann-Kendall 趋势分析法

本文所使用的趋势检验方法是一种非参数统计方法,该方法在水文气象研究当中已经得到了广泛的应用,能够检验某一变量过程是否存在突变趋势。Mann-Kendall(MK)检验统计量 K 计算公式为^[24]

$$K = \sum_{a=1}^{k-1} \sum_{b=a+1}^k \operatorname{sgn}(x_b - x_a) \quad (8)$$

其中

$$\operatorname{sgn}(x_b - x_a) = \begin{cases} 1 & (x_b - x_a > 0) \\ 0 & (x_b - x_a = 0) \\ -1 & (x_b - x_a < 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中 k ——数据点的数量

x_a, x_b ——时间序列 a, b 中的数值

方差计算公式为

$$\sigma^2(K) = \frac{k(k-1)(2k+5) - \sum_{c=1}^l t_c(t_c-1)(2t_c+5)}{18} \quad (10)$$

式中 t_c ——第 c 个数对应的捆绑值

l ——捆绑值的数量

本研究观测值连续且样本数量 $k > 10$, 因此标准正态检验统计量计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{K-1}{\sqrt{\sigma^2(K)}} & (K > 0) \\ 0 & (K = 0) \\ \frac{K+1}{\sqrt{\sigma^2(K)}} & (K < 0) \end{cases} \quad (11)$$

表2 模型率定参数范围及参数最优值

Tab.2 Optimal simulation parameters and parameter range

参数	初定范围		最终范围		最优值
	最小值	最大值	最小值	最大值	
基流 α 因子(ALPHA_BF. gw)	0	1	0.48	0.71	0.64
地下水时间延迟(GW_DELAY. gw)	0	500	238.32	348.51	321.21
地下水 revap 系数(GW_REVAP. gw)	0.02	0.20	0.09	0.18	0.13
深层含水层的渗透系数(RCHRG_DP. gw)	0	1	0.35	0.63	0.38
主河道曼宁系数(CH_N2. rte)	-0.01	0.30	0.22	0.30	0.26
主河道冲积物有效渗透系数(CH_K2. rte)	-0.01	500.00	1.01	120.00	22.28
河岸调蓄基流 α 因子(ALPHA_BNK. rte)	0	1	0.53	0.72	0.64
植物吸收补偿因子(EPCO. hru)	0.01	1.00	0.42	0.63	0.48
最大冠层降水截留量(CANMX. hru) /mm	0	100	1.03	28.32	8.32
土壤蒸发补偿因子(ESCO. hru)	0.01	1.00	0.12	0.49	0.31
SCS 径流曲线数(CN2. mgt)	35	98	42.00	70.00	56.03

优参数系列,并计算最优参数下的模拟值和实测值的纳什效率系数 N_s 和决定系数。针对上述6个站点,模型校准期和验证期的模拟结果如图2所示,两个黄河干流站点模拟效果好,其他大部分站点的模拟值与实测值吻合度较好。模型预测的评价系数满足评价标准,模型模拟结果能够为研究区域水资源合理利用提供有效的参考价值。

2.2 河龙区间雨水资源化潜力计算结果分析

在气候变化导致年均降水量逐渐上升和退耕还林(草)工程实施的双重背景下,河龙区间雨水资源化潜力将不可避免地出现剧烈变化。图3为

Z 值代表标准正态试验统计量,当其为正时表示数列有增加趋势,为负时则表示有减少趋势。趋势检验在给定的 α 置信水平上进行,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设不可接受。当 $|Z| > 1.28$, 则表明数列通过90%置信度的显著性检验;当 $|Z| > 1.64$, 则表明数列通过95%置信度的显著性检验;当 $|Z| > 2.32$, 则表明数列通过99%置信度的显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水文模型的校验结果

选择研究区内2个黄河干流上的站点以及4个子流域径流资料对水文模型进行校准和验证,站点分别为龙门站、府谷站、安塞站、绥德站、温佳川站、大宁站。校准期为1981—1985年,验证期为1986—1990年。使用SWAT-CUP软件中的自动校准方法设定适合黄土高原的参数范围,对模型进行参数校准和模拟结果的验证,自动校准的取值范围及最终参数取值结果如表2所示。

SWAT-CUP软件根据水量平衡原理自动对水文站径流的模拟和实测数据进行对比,同时选取最

1980—2015年河龙区间年平均雨水资源化潜力的时间变化趋势。由图可知,研究区地表径流量、土壤有效水增量以及雨水资源化潜力三者均呈上升趋势。其中,地表径流量上升速率为0.3663 mm/a,土壤有效水增量上升速率为0.5546 mm/a,雨水资源化潜力的上升趋势最为明显,达到了0.9209 mm/a。同时,图3表明土壤有效水增量是雨水资源化潜力的主要构成因素,其原因是黄土高原地区土质松软、吸水性强,因此在分析黄土高原水资源状况时土壤有效水是不可或缺的一部分。

通过计算各子流域多年平均地表径流量及土壤

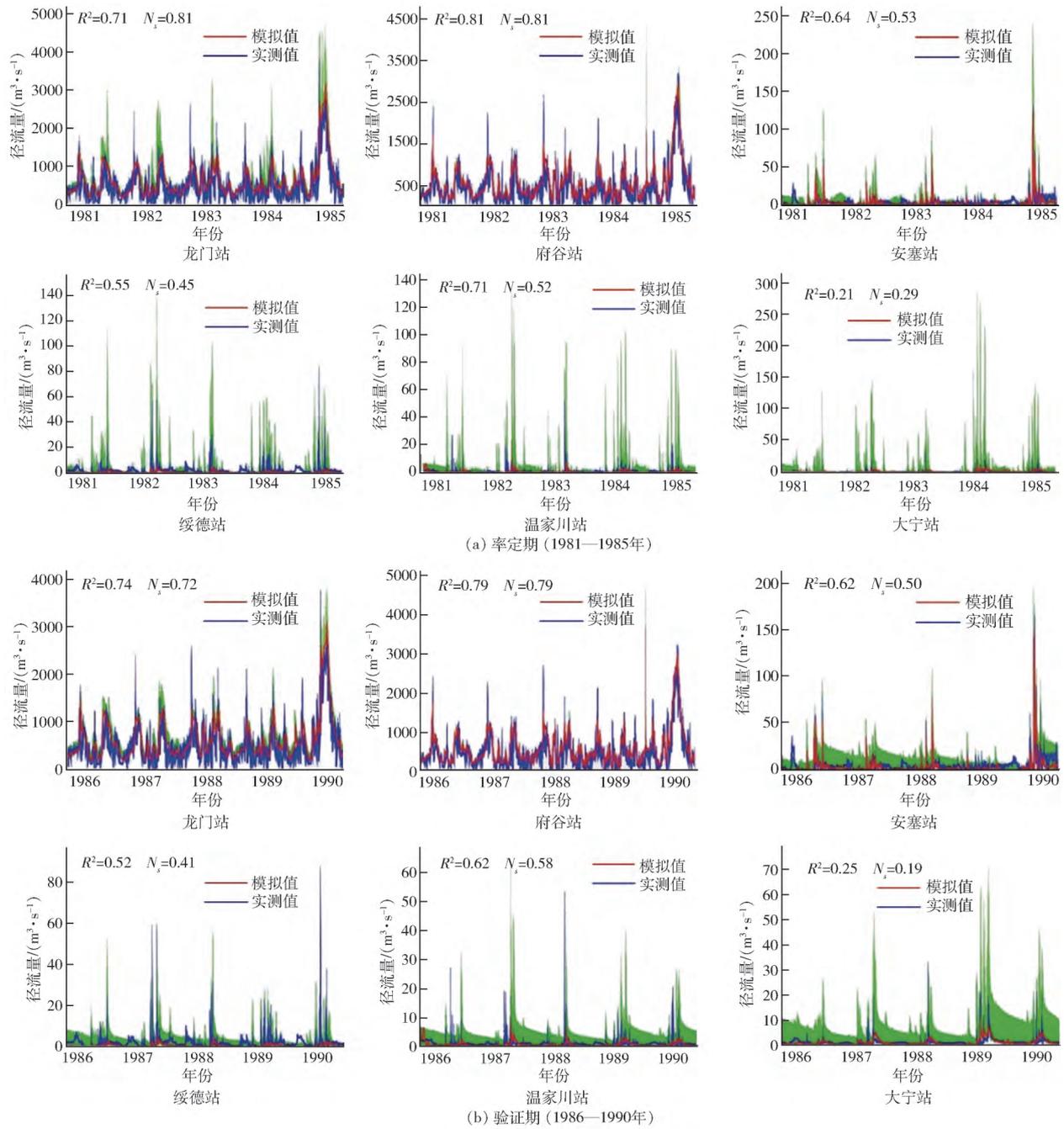


图 2 模型率定和验证结果

Fig. 2 Results of model calibration and verification

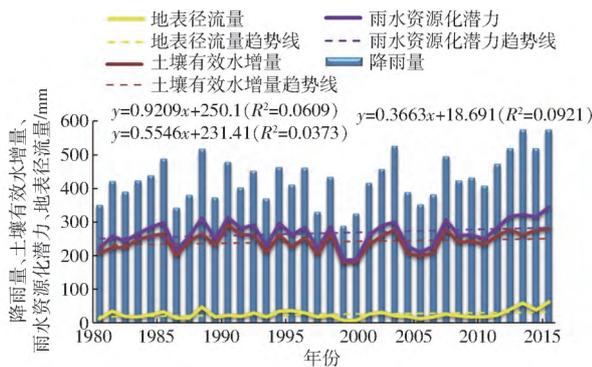


图 3 河龙区间雨水资源化潜力变化趋势

Fig. 3 Trends of rainwater harvesting potential in Helong Region

有效水增量,并通过式(8)~(10)进行MK检验,检测1980—2015年河龙区间每个子流域的地表径流量、土壤有效水增量及雨水资源化潜力的变化趋势,用以分析河龙区间地表径流量、土壤有效水增量以及雨水资源化潜力的空间分布及趋势变化规律。如图4a所示,河龙区间地表径流量主要呈中部较少、南北方向较多的分布规律,年均地表径流为25.5 mm。图4b为研究区土壤有效水增量的空间分布情况,呈东南向西北地区递减的变化趋势,年均土壤有效水增量为241.7 mm。图4c则反映了河龙区间雨水资源化潜力的空间分布情况,与土壤有效水增量的空间分布及趋势变化情况类似,河龙区间雨

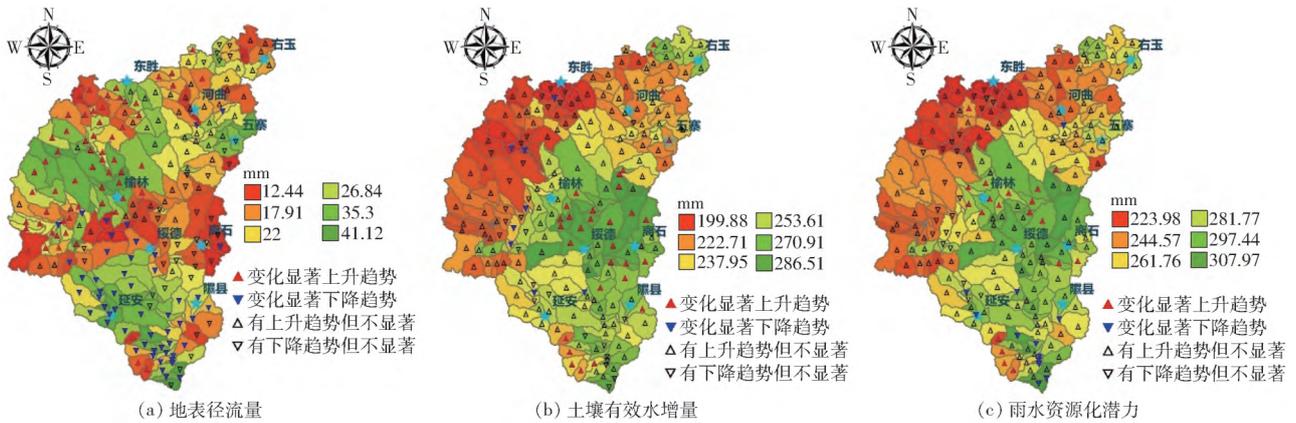


图 4 地表径流量、土壤有效水增量和雨水资源化空间趋势分布

Fig. 4 Spatial trend distributions of surface runoff , soil water incremental and rainwater harvesting potential

水资源化潜力在空间上呈由东南向西北递减趋势，多年平均可利用潜力超过 267 mm，雨水资源化潜力最大值为 307.97 mm。

如图 4a 所示，河龙区间西北大部分子流域的年均地表径流量通过了 95% 的置信水平，呈显著上升的趋势，南部地区则呈显著下降趋势，其余地区 MK 趋势检验的 Z 值均在 [-1.64, 1.64] 区间内，未表现出显著的变化趋势，但是大体上呈现南部下降北部上升的趋势。从图 4b 可以发现，大部分子流域土壤有效水增量都呈现上升趋势，其中河龙区间东部以及西南部子流域有显著上升趋势，西部个别子流域呈显著下降趋势。图 4c 表明河龙区间大部分子流域的雨水资源化呈上升趋势，其中北部、中部部分地区上升趋势显著，南部极少部分子流域下降趋势显著。通过对比发现，雨水资源化潜力变化趋势与土壤有效水增量变化趋势相似，但具有显著性变化子流域的个数有所不同。这也进一步说明了土壤有效水是黄土高原雨水资源化潜力的主要组成部分，同时随着气候变化和人类活动，河龙区间雨水资源有总体增长的趋势。

2.3 气候变化和土地利用对河龙区间雨水资源化潜力的影响

采用情景分析法进一步探索影响河龙区间雨水资源的主要因素是气候变化还是人类活动。具体情景设定按照 1.4 节设置 3 个情景：基准期 (S1)、气候变化情景 (S2)、土地利用/覆盖变化情景 (S3)。表 3 列出了基准期 (S1)、变化情景 1 (S2) 和变化情景 2 (S3) 下对应的地表径流量、多年平均土壤有效水增量以及雨水资源化潜力的计算结果。气候和土地利用/覆盖变化对雨水资源化潜力的影响贡献率分析结果根据 1.4 节贡献率计算方法计算。

通过对比分析，气候变化对土壤有效水增量和地表径流量均为积极影响，即在土地利用不变的情

表 3 气候变化和土地利用对雨水资源化潜力的影响贡献率

Tab. 3 Contribution rate of climate change and land use to rainwater harvesting potential

参数	S1	S2	S3	气候变 化影响	土地利用/ 覆盖变化影响
土壤有效水增量/mm	236.3	267.2	249.2	30.9	-18.0
地表径流量/mm	22.8	37.6	29.2	14.8	-8.4
雨水资源化潜力/mm	259.1	304.8	278.4	45.7	-26.4
影响贡献率/%				63.4	-36.6

况下，研究区仅受气候变化影响时土壤有效水增量和地表径流量均增多。其中多年平均土壤有效水增量增加 30.9 mm，多年平均地表径流量增加 14.8 mm，多年平均雨水资源化潜力增加 45.7 mm。土地利用/覆盖变化对土壤有效水增量和地表径流量均为消极影响，即在气候不变的情况下，研究区仅受土地利用变化影响时土壤有效水增量和地表径流量均减少。其中多年平均土壤有效水增量减少 18.0 mm，多年地表径流量减少 8.4 mm，多年平均雨水资源化潜力减少 26.4 mm。基于式 (3) ~ (7) 贡献率计算方法，气候变化对雨水资源化潜力变化的贡献率为 63.4%，且为正影响；土地利用/覆盖变化对雨水资源化潜力变化的贡献率为 -36.6%，为负影响。由此可以看出，在 2000—2015 年气候变化和土地利用/覆盖变化共同影响的时期，气候变化对流域内雨水资源化潜力的变化起到主导作用，而土地利用/覆盖变化的影响稍弱。计算结果表明，在 2000 年以后气候变化增加了当地雨水资源，这与该时间段降雨量增长有密不可分的关系。但增加的雨水资源又会被人类活动带来的土地利用/覆盖变化削弱，使得雨水资源增长程度减小。因此，要时刻关注黄土高原地区人类活动所带来的影响，提高雨水收集利用率，发展雨水收集、精准灌溉技术，更好地利用河龙区间的雨水资源。

3 讨论

3.1 雨水资源化潜力对退耕还林(草)工程可持续性评价

植被是陆地生态系统的主体,在水土保持、调节大气成分以及减缓温室气体浓度上升和维持气候稳定等方面具有不可替代的作用,地表植被覆盖变化对地理环境将产生巨大影响^[25-26]。为探究河龙区间植被恢复情况,利用 2000 年和 2015 年 9 月 1 日的 NDVI 数据及雨水资源化潜力数据,分析计算退耕还林(草)工程实施以来 NDVI 和雨水资源化潜力的变化情况,并采用 GIS 工具表征其空间格局。

如图 5a 所示,自退耕还林(草)以来,河龙区间大部分地区 NDVI 年均值呈现增长趋势,个别地区 NDVI 年均值有所下降,且研究区域北部较为集中。全区近一半区域 NDVI 变化率大于 40%,这表明 2000—2015 年间研究区大部分区域植被覆盖状况显著好转。同样的,自退耕还林(草)政策实施以来,研究区雨水资源化潜力也发生了大幅度波动。如图 5b 所示,河龙区间南部部分子流域有下降趋势,而中部和北部则呈现出大范围的上升趋势,中部地区上升超过了 200%。总体来看,河龙区间雨水资源化潜力呈现出明显的增加趋势。图 6 为研究期间 NDVI 年均值与雨水资源化潜力的散点图。由图可见,两者的决定系数为 0.554,拟合程度一般,但呈正相关关系。

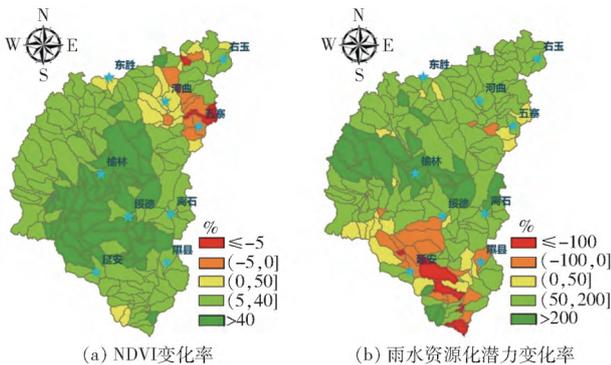


图 5 退耕还林(草)工程实施后 NDVI 变化率与雨水资源化潜力变化率空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of NDVI and rainwater harvesting potential changing trend after GFG Project

植被和水的相互作用关系是水文学领域极为重要的研究内容。在我国长江流域和黄河流域的研究表明,在气候湿润的长江流域,植被覆盖较好区域的产流量大于少林或无林流域;在干燥旱区的黄河流域,林木生长势必引起蒸腾、蒸发量的增加,区域产流量减小^[27]。本研究发现在气候变化的背景下,植被覆盖和雨水资源化潜力存在一定的相关关系,但

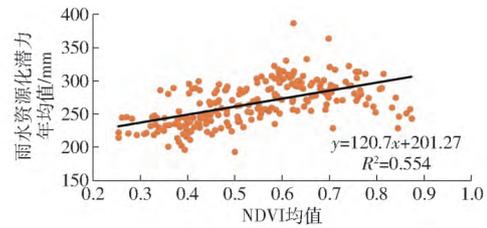


图 6 雨水资源化潜力与 NDVI 相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between rainwater harvesting potential and NDVI

雨水资源化潜力实际上受多种因素的影响,植被覆盖只是其中的一项。雨水资源化潜力的增加又为植被提供更好的生长环境,目前黄土高原退耕还林(草)是否可持续还存在争议。通过前文的分析可以发现,在气候变化的背景下,黄土高原雨水资源较为充足,可以满足现状条件下区域生态恢复用水需求。

大规模植被恢复实施后,黄土高原植被覆盖状况得到了明显改善,大部分区域植被恢复效果显著。植被恢复一方面对于减缓土壤侵蚀、控制水土流失有着积极的作用^[28],但另一方面,又会造成区域耗水量的急剧增加,进一步加剧区域水资源短缺现状^[3]。近年来随着气候变化,暴雨频率增加,更加需要植被来保持水土。同时总的降雨量也在增加,使得黄河中游地区雨水资源化有上升趋势^[29]。若采取合理的工程技术措施对地表径流和土壤有效水进行调控利用,可最大程度发挥退耕还林(草)工程的效益,同步缓解干旱缺水与水土流失的问题。

3.2 基于 SWAT 模型雨水资源化潜力计算的不确定性

本研究利用水文模型来计算雨水资源化潜力可以提高计算的精度,但由于水文模型本身存在一定的不确定性,因此带来雨水资源化潜力计算的不确定性:①由模型经验公式带来的不确定性。SWAT 模型为半分布式水文模型,模型内部引用的部分公式为经验公式,不一定适合黄土高原地区。②气候变化和土地利用变化单独考虑带来的不确定性,然而事实上气候变化可以影响植被生长、人类活动、土地利用/覆盖的变化等,人类活动又反过来会导致气候变化。在模型当中将两者独立考虑可能会带来贡献率计算的偏差。③黄土高原地区植被恢复的不确定性。近 20 年,黄土高原植被得到了很好的恢复,这极大地改变了下垫面要素。单从土地利用/覆盖变化来描述植被恢复不够准确,需要从植被生长、生态水文的角度考虑问题。

4 结论

(1) 构建了黄河流域河龙区间的 SWAT 模型,

并将雨水资源化潜力的计算方法与模型相结合,在水文响应单元以及子流域两个空间尺度上计算出雨水资源化潜力,为评估雨水资源化潜力提出了新方法。

(2) 在气候变化和人类活动的双重背景下,黄河流域河龙区间的地表径流量、土壤有效水增量和雨水资源化潜力均呈现上升趋势。通过 MK 检验和空间趋势分布发现,由于气候变化和人类活动的双重影响,河龙区间大部分子流域雨水资源有增长趋势,河龙区间雨水资源较为充足,可以满足现有条件

下区域生态恢复的用水需求。

(3) 利用情景分析法和贡献率计算法得出,气候变化对雨水资源化潜力变化的贡献率为 63.4%,对雨水资源化起正影响作用;土地利用/覆盖变化对雨水资源化潜力变化的贡献率为 -36.6%,为负影响。气候变化增加了当地雨水资源,但这种增长又会被人类活动削弱。因此,要时刻关注人类活动所带来的影响,提高雨水收集利用率,更好地利用河龙区间的雨水资源。

参 考 文 献

- [1] 张宝庆. 黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZHANG Baoqing. Study on drought time and space variation and the rainwater harvesting potential in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [2] 易小波, 贾小旭, 邵明安, 等. 黄土高原区域尺度土壤干燥化的空间和季节分布特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 373-381.
YI Xiaobo, JIA Xiaoxu, SHAO Ming'an, et al. Regional spatial and seasonal characteristics of soil desiccation on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 373-381. (in Chinese)
- [3] CHEN L D, HUANG Z L, HUANG Y L, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. CATENA, 2007, 70(2): 200-208.
- [4] 乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 515-522.
QIAO Jiangbo, ZHU Yuanjun, JIA Xiaoxu, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile in the critical zone of the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 515-522. (in Chinese)
- [5] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持与雨水资源化[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 107-111.
WU Pute, GAO Jian'en. Soil and water conservation and the rainwater harvesting potential in the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 107-111. (in Chinese)
- [6] NNAJI C C, MAMA N C. Preliminary assessment of rainwater harvesting potential in Nigeria: focus on flood mitigation and domestic water supply [J]. Water Resources Management, 2014, 28(7): 1907-1920.
- [7] 曹伟, 高云飞, 李智广, 等. 河龙区间水土保持工程与耕作措施减沙量计算[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 130-133.
CAO Wei, GAO Yunfei, LI Zhiguang, et al. Calculation of sediment reduction by soil and water conservation project and tillage measures in Helong section [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 130-133. (in Chinese)
- [8] ZHANG B Q, WU P T, ZHAO X N, et al. Assessing the spatial and temporal variation of the rainwater harvesting potential (1971-2010) on the Chinese Loess Plateau using the VIC model [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(3): 534-544.
- [9] 赵西宁, 冯浩, 吴普特, 等. 黄土高原小流域雨水资源化综合效益评价体系研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 354-360.
ZHAO Xining, FENG Hao, WU Pute, et al. Study on comprehensive benefit evaluation system of rainwater resources in small watersheds of the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(3): 354-360. (in Chinese)
- [10] 冯浩, 邵明安, 吴普特. 黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价初探[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 140-144.
FENG Hao, SHAO Ming'an, WU Pute. Calculation and assessment of developing potential for converting rain water to resources in small watershed on the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(2): 140-144. (in Chinese)
- [11] ZHAO X N, WU P T, FENG H. Towards development of eco-agriculture of rainwater-harvesting for supplemental irrigation in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2009, 195(6): 399-407.
- [12] 高晓东, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土丘陵区沟道小流域土壤有效储水量估算[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 734-742.
GAO Xiaodong, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Estimating spatial mean available water storage in a small catchment of the hilly area of the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 734-742. (in Chinese)
- [13] LIANG W, BAI D, WANG F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau [J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [14] AREAS I M. Dynamic impacts of climate and land-use changes on surface runoff in the mountainous region of the Haihe river basin, China [J]. Advances in Meteorology, 2018: 3287343.
- [15] NING T T, LI Z, LIU W Z. Separating the impacts of climate change and land surface alteration on runoff reduction in the Jing River catchment of China [J]. CATENA, 2016, 147: 80-86.
- [16] 降亚楠, 王蕾, 魏晓妹, 等. 基于 SWAT 模型的气候变化对泾河径流量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):

262–270.

JIANG Ya'nan , WANG Lei , WEI Xiaomei , et al. Impacts of climate change on runoff of Jinghe river based on SWAT model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2017 , 48(2) : 262 – 270. http://www.j-esam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170235&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.035. (in Chinese)

- [17] 宫兴龙,付强,王斌,等. 土地利用方式变化对水循环过程响应机制研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):252–259. GONG Xinglong , FU Qiang , WANG Bin , et al. Mechanism of response of land use change to water cycle process [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2018 , 49(2) : 252 – 259. http://www.j-esam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.032. (in Chinese)
- [18] 穆兴民,戴海伦,高鹏,等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(3):37–43. MU Xingmin , DAI Hailun , GAO Peng , et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment , 2010 , 24(3) : 37 – 43. (in Chinese)
- [19] 马文进,蔡文彦,曹胜利,等. 黄河中游河龙区间水沙特性分析[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会学术讨论会论文集,2007.
- [20] ZHANG B Q , WU P T , ZHAO X N , et al. Spatiotemporal analysis of climate variability (1971—2010) in spring and summer on the Loess Plateau , China [J]. Hydrological Processes , 2014 , 28(4) : 1689 – 1702.
- [21] 余海龙,吴普特,李巧珍,等. 黄土高原小流域雨水资源化技术途径及其效益分析[J]. 灌溉排水学报,2004,23(2):77–80. YU Hailong , WU Pute , LI Qiaozhen , et al. Technical approach and benefit analysis of rainwater resources in small watersheds of the Loess Plateau [J]. Journal of Irrigation and Drainage , 2004 , 23(2) : 77 – 80. (in Chinese)
- [22] ARNOLD J G , MORIASI D N , GASSMAN P W. SWAT: model use , calibration , and validation [J]. Transactions of the ASABE , 2012 , 55(4) : 1345 – 1352.
- [23] ARABI M , FRANKENBERGER J R , ENGEL B A , et al. Representation of agricultural conservation practices with SWAT [J]. Hydrological Processes , 2008 , 22(16) : 3042 – 3055.
- [24] MILAN G , SLAVISA T. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980—2010 [J]. Journal of Hydrology , 2013 , 494: 32 – 42.
- [25] FEDDEMA J J , OLESON K W , BONAN G B , et al. The importance of land-cover change in simulating future climates [J]. Science , 2005 , 310(5754) : 1674 – 1678.
- [26] FENSHAM R J , FAIRFAX R J , ARCHER S R. Rainfall , land use and woody vegetation cover change in semi-arid Australian savanna [J]. Journal of Ecology , 2010 , 93(3) : 596 – 606.
- [27] 余新晓. 生态水文学前沿[M]. 北京: 科学出版社 2015.
- [28] HE X B , LI Z B , HAO M D , et al. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil-water conservation on Loess Plateau of China [J]. Agriculture Ecosystems Environment , 2003 , 94(3) : 355 – 361.
- [29] ZHAO Q , CHEN Q Y , JIAO M Y , et al. The temporal-spatial characteristics of drought in the Loess Plateau using the remote-sensed TRMM precipitation data from 1998 to 2014 [J]. Remote Sensing , 2018 , 10(6) : 838.