

甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素

柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 巩杰, 燕玲玲

(兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 白龙江流域是长江上游的主要生态屏障和水源涵养区, 对维系流域生态和可持续发展至关重要。以甘肃白龙江流域为例, 基于参数本地化的InVEST模型对1990—2016年水源涵养时空变化及其影响因素进行分析。结果表明: 流域多年平均水源涵养深度为47.50 mm, 呈现先减少后回升的趋势。空间上, 其高值区主要集中于迭部、文县和舟曲的中高山阴陡坡林区(平均涵养深度在该三县2500~3500 m海拔段、阴坡和半阴坡、25°以上坡段和林地高于流域的平均涵养深度); 低值区主要位于宕昌和武都的中低山阳缓坡农牧区(平均涵养深度在该两县2500 m以下海拔段、阳坡和半阳坡、25°以下坡段和耕、草地低于流域的平均涵养深度)。气候背景下, 人类活动驱动的土地利用/覆被格局空间差异是影响水源涵养时空变化的重要因素, 退耕还林对减缓气候变暖背景下水源涵养深度的下降具有重要意义。

关键词: 水源涵养; 时空格局; InVEST模型; 甘肃白龙江流域

生态系统为人类福祉的有序提升提供了各种物质产品和文化环境^[1]。其中, 水作为生命之源, 承载并驱动着不同尺度生态系统过程的物质和能量循环, 并在运移、转换的过程中产生了多种服务效应^[2], 例如水质净化、径流调节和水源涵养等。同时在气候变化背景下, 人口增长和城市化进程使得人们对水资源的需求不断增加, 全球性水资源紧缺、水环境恶化和水土流失, 以及局部干旱和洪涝灾害等问题的加剧, 使人们对生态系统的水文服务越发重视^[3-6]。因此, 开展生态系统水文服务的空间可视化定量评估及其重要性分区, 对实现区域社会生态系统管理和可持续发展意义重大。

水源涵养是一定时空范围和条件下, 生态系统将水分保持在系统内的过程和能力^[2], 在气候变化、地形差异、土地利用/覆被变化(LUCC)和土壤理化性质等因素的综合影响下, 具有空间异质性和动态复杂性^[6]。因此, 如何科学评价水源涵养服务一直是生态学和水文学等相关学科的研究热点。随着研究的不断深入——从单一认识生态系统对河流流量的影响(主要为径流调节)到全面理解水源涵养服务的各种表现形式(包括拦蓄降水、净化水质和土壤含水量等), 人们逐步认识到水源涵养服务在区域生态安全和人类福祉等方面的重要性^[7], 并开展了大量研究。国外学者多侧重产水量或产沙量的评估及其气象、水文因素分析^[8,9]; 国内学者则通过实地采样和间接评估等方法对国家、市县和流域等不同尺度以及森林、草原和农田等生态系统的水源涵养时空变化及其影响要素进行了研究^[10-13]。但已有的时空格局研究多是各子流域或各行政单元间涵养量的差异比较^[5,14], 缺乏对不同生态系统类型(土地利用类型或植被类型)或地形要素(高程、坡度等)上

收稿日期: 2019-04-25; 修订日期: 2019-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771196, 41271199)

作者简介: 柳冬青(1993-), 男, 安徽黟县人, 硕士, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: liudq16@lzu.edu.cn

通讯作者: 巩杰(1975-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 教授, 主要从事景观生态学、土地变化科学和环境遥感等研究。

E-mail: jgong@lzu.edu.cn

水源涵养服务的时空异质性分析。各类用地或植被下发育的土壤类型存在差异,且复杂多变的地形制约着人类活动的空间分布。同时,对成因的分析多为涵养量与气候、人类活动等因素的相关性或主成分分析,而成因的定量分析鲜有报道。此外,由于生态系统服务的尺度效应,只有探讨水源涵养服务在区域、生态系统类型和地形等不同单元的时空动态格局及其成因才能更为科学地理解大中尺度的水源涵养特征,为管理者提供科学依据^[15,16]。

甘肃白龙江流域地处青藏高原向秦巴山地和黄土高原的过渡带,是长江上游重要的水源涵养区和生态屏障^[17]。该流域生态脆弱,山大沟深、土层浅薄,受突发性强降水影响,滑坡、泥石流、洪水等自然灾害频发,严重威胁当地人民的财产和生产生活。为缓解自然水土过程与人类工农业生产间的矛盾,水源涵养能力的提高对降低该流域水土流失等灾害风险具有重要意义。因此,本文基于InVEST模型产水模块评估了1990—2016年甘肃白龙江流域水源涵养量,并探讨其时空变化成因,以期为流域生态文明建设提供一定的科学参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

甘肃白龙江流域地处甘肃省东南部(32°36′~34°24′N, 103°00′~106°30′E),主要包括陇南市的宕昌县、武都区、文县和甘南藏族自治州的迭部县、舟曲县(图1)。全域海拔568~4860 m,自西北向东南逐渐降低。主要的地貌类型有山地、河谷和丘陵等。自上游到下游依次为高寒阴湿气候区—温带半湿润区—亚热带湿润气候区。夏季温度高降雨多,冬季温度低降雨少,年均温6~14.9 °C,降水量介于400~850 mm之间。受季风影响,温度和降水均表现为由东南向西北递减的趋势,气候具有显著的垂直地带性。流域内森林覆盖度较高,植被类型多样。棕壤、高山草甸土、褐土等是主要的土壤类型。

1.2 研究方法

1.2.1 基于InVEST模型的水源涵养评估

目前,水源涵养的估算主要有林冠截留剩余量法、蓄水能力法(土壤或综合)、水量平衡法和InVEST模型等。其中,前两种方法简单易行,但对地表蒸发和径流等因素考虑较少,往往使结果偏大^[11];水量平衡法主要考虑系统中水量的输入(降水)和输出(蒸散发、地表径流),其结果较为准确^[7],但未考虑地形对径流的影响。基于水量平衡原理,InVEST模型综合了地形因子和地表径流差异等因素对水源涵养量进行评估,使结果更为科学。同时,对俄勒冈州威拉米特河、石羊河和黑河等流域产水或水源涵养评估^[15,18,19],也体现了该模型具备参数调整灵活、评估结果空间表达性强以及多时空、多尺度、多情景和多目标的权衡等优点^[20]。其具体方法如下:

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{soil}}{300}\right) \times Y \quad (1)$$

$$TI = \lg\left(\frac{Watershed\ pixel\ count}{Soil\ depth \times Percent\ slope}\right) \quad (2)$$

$$Y_{x,j} = \left(1 - \frac{AET_{x,j}}{P_x}\right) \times P_x \quad (3)$$

式中:WR代表水源涵养量(mm);Velocity为径流系数;TI指代地形指数;K_{soil}代表土壤

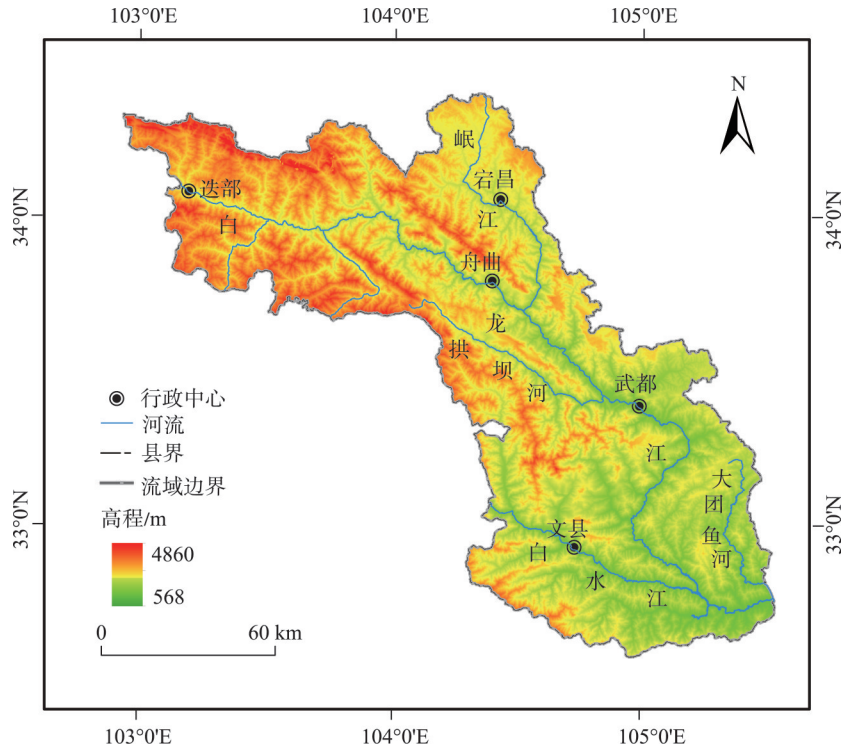


图1 研究区概况

Fig. 1 Location of the study area

饱和导水率 (cm/d); Y 是单元产水量 (mm); *Watershed pixel count* 表示汇流累积栅格数; *Soil depth* 表示土壤深度 (mm); *Percent slope* 是百分比坡度; $Y_{x,j}$ 代表 j 类景观上栅格 x 的年产水量 (mm); $AET_{x,j}$ 则为年实际蒸散量 (mm); P_x 为栅格单元 x 的年降水量 (mm)。

$$\frac{AET_{x,j}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{x,j}}{1 + \omega_x R_{x,j} + 1/R_{x,j}} \quad (4)$$

$$R_{x,j} = \frac{k_{x,j} \times ET_0}{P_x} \quad (5)$$

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (6)$$

$$AWC_x = \min(\max \text{Soil Depth}_x, \text{Root Depth}_x) \times PAWC \quad (7)$$

式中: $R_{x,j}$ 代表 j 类景观上栅格 x 处的干燥度指数; $k_{x,j}$ 为植被的蒸散系数; ω_x 表示气候—土壤属性的非物理参数; Z 为季节常数, 其值域为 1~10, 根据已有研究, 当取值 3.2 时结果相对科学^[16]; AWC_x 是植物可利用的体积含水量 (mm); $\max \text{Soil Depth}_x$ 表示最大土壤深度 (mm); Root Depth_x 是最大根系限制深度 (mm); $PAWC_x$ 则为植物可利用水。

1.2.2 基于 G_i^* 空间统计的冷热点分析

基于 G_i^* 统计法进行显著性分级的冷热点分区较直接分类 (预先设定的面积比例或栅格单元高值的前 20%~40%) 其结果斑块连通性较好^[21]。可通过 ArcGIS 空间分析模块中的冷热点分析工具模块对数据集进行计算 Getis-Ord G_i^* 。根据各斑块间的 Z 得分, 直接反映高低值 (冷热点) 在空间中的聚类分布, Z 值越高, 热点区域的集聚越明显。其计算公式^[22]如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j}\right)^2}{n-1}}} \quad (8)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (9)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n-1} - (\bar{X})^2} \quad (10)$$

式中: x_j 为斑块 j 属性值; w_{ij} 为空间权重矩阵; n 为总斑块数(个)。

1.2.3 基于Geographical Detector的影响因素分析

地理探测器(Geographical Detector)是探测地理现象空间分异及其背后驱动因素的一种统计学方法^[23]。主要包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测4个模块,其具有同时探测多个因子在不同空间单元的不同影响作用及其交互关系的优势^[24]。本文主要通过因子探测和交互探测两个模块对流域水源涵养服务时空变异的影响因素及其间的相互作用进行定量分析,且计算公式如下:

$$P_{D,I} = 1 - \frac{1}{N\sigma_I^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (11)$$

式中: $P_{D,I}$ 表示影响因子 D 对水源涵养 I 的探测力值,域值范围为[0, 1],值越高说明分类因素对水源涵养的影响越大; N 、 σ_I^2 分别为整个流域的样本量(个)和方差; N_i 、 σ_i^2 分别为 i ($i=1, 2, \dots, L$)层样本量(个)和方差。

1.3 数据来源与处理

InVEST水源涵养模型所要参数有土地利用栅格图、降水、潜在蒸散发、流域及其子流域、土壤深度数据、最大根系限制深度、植物可利用含水量水、径流系数、地形指数、土壤饱和和导水率和高程(DEM)等,水源涵养服务影响因素考量的社会生态要素有人口密度、粮食单产、单位面积载畜量、植被覆盖度(NDVI)、综合景观破碎度和用地强度等,数据本地化处理见表1。

2 结果分析

2.1 流域水源涵养服务时空分布特征

1990—2016年间,甘肃白龙江流域平均水源涵养量先降后升,总体趋于减少趋势。2002年涵养量为42.65 mm,相对1990年年均下降1.37%;而后年均增长1.03%,至2016年回升至48.80 mm;近26年来,流域平均水源涵养量下降了0.65%。其空间分布格局基本维持稳定,高值区集中于武都东南部和文县南部,多年平均涵养量在67.19~76.86 mm之间;较高值区分布在迭部大部、宕昌西部和舟曲中西部,多年平均涵养量在46.53~55.71 mm之间;低值区连片分布于宕昌—舟曲—武都段白龙江两岸及其以北的人口密集区和文县北部农作区,多年平均涵养量在21.38~28.88 mm之间。(图2)。

2.2 不同空间单元的水源涵养服务时空变化

区域间人类活动往往受制于自然资源条件、产业结构与文化差异的影响,其首先作

表1 数据来源及本地化处理

Table 1 Data sources and localization processing

所需数据	本地化处理
土地利用	下载自美国地质调查局的30 m空间分辨率的Landsat TM/ETM+遥感影像;参考《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010-2007)并结合研究区实际情况,对1990—2016年三期影像进行目视解译获得
降水	根据中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn)、流域及流域周边各县区气象局18个站点的1990—2016年月降水量进行空间插值获得
潜在蒸散	基于采用Modified-Hargreaves公式计算,其中所需数据包括1990—2016年各气象站点的日最高气温、日最低气温和太阳顶层辐射等
(子)流域	基于DEM数据在ArcSWAT平台上提取
土壤深度	基于甘肃第二次土壤普查数据,并结合野外土壤样点剖面数据得到
根系深度	参考相关研究成果 ^[16] ,以土地利用/覆被类型为单元构建根系深度CSV表格
植物可利用水	基于甘肃省土壤普查数据,PAWC为田间持水量和永久萎蔫系数的差值,两者分别由经验公式计算 ^[25]
径流系数	参考模型参数表数据
地形指数	根据土壤深度、百分坡度和汇水面积计算获得
土壤饱和导水率	采用流域实测的土壤粘粒、粉粒和粗砂百分比含量在Wosten模型中计算获得
DEM	从USGS官网(https://www.usgs.gov)上获取,空间分辨率为30 m
NDVI	MOD13Q1卫星数据,空间分辨率为250 m
人口密度、粮食单产 量单位面积载畜量	根据甘肃省基础地理信息中心提供的乡镇边界对各县区统计年鉴中的人口、农牧业信息进行空间可视化
综合景观破碎度	以边缘密度ED、蔓延多样性SHDI和蔓延度指数CONTAD的综合指标插值获得 ^[26]
土地利用强度	在乡镇单元上根据土地利用强度指数计算获得 ^[27]

用于土地利用,进而影响生态系统过程——陇南三县区(武都、宕昌和文县)为农耕地,耕地分布较广;甘南州两县(迭部和舟曲)为农牧交错区,草地比例大。同时,生态系统服务变化主要源于气候和地形等环境因子的异质性。因此,本文对各县区、地形要素和主要地类的水源涵养量进行分区统计(图3~图7),能进一步明确流域水源涵养服务时空分布特征。

2.2.1 不同县区平均水源涵养量

1990年和2002年县区尺度上平均水源涵养量表现为迭部>文县>舟曲>武都>宕昌,且前两县的高于流域涵养量;2016年舟曲的涵养量超过文县,且前三县的高于流域涵养量(图3a)。这种分布差异与各县区的降水量以及林、草地比例呈正相关,与人口密度、景观破碎度、潜在蒸散量以及建设用地、耕地(建、耕地)比例呈负相关(图3b)。年际变化上,武都、迭部与流域涵养量一致(1990年的较高于2016年的,且明显高于2002年的);宕昌表现为1990年的略高于2016年的,且明显高于2002年的;文县表现为1990年的显著高于2016年和2002年的;舟曲表现为2016年的较高于1990年的,且显著高于2002年的(图3a)。这与各县区降水量和林、草地比例变化有关:2002—2016年,宕昌林、草地比例和降水分别增加了11.67%、17.39%,致使水源涵养量回升明显;文县林、草地比例增加较少(6.51%),且降水相对下降了8.22%,致使水源涵养量回升缓慢;舟曲林、草地比例增加很少(1.03%),但降水增加显著(19.68%),致使水源涵养量回升显著。

2.2.2 不同地形上平均水源涵养量

海拔梯度上,流域三个年份平均水源涵养量均大致以3000 m为界呈现先增后减的趋

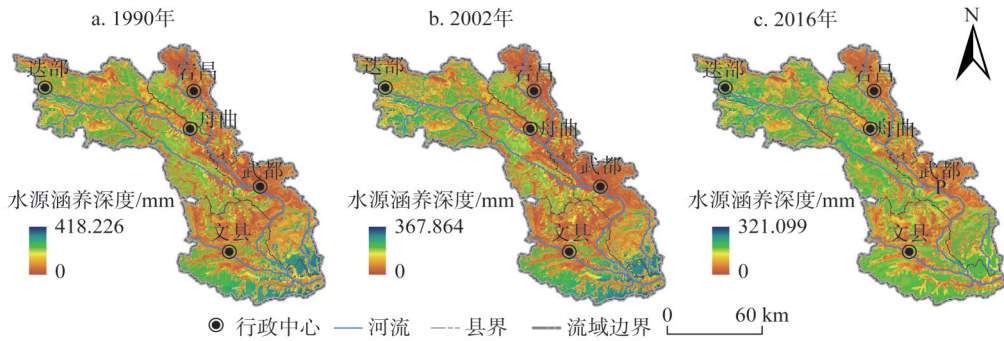
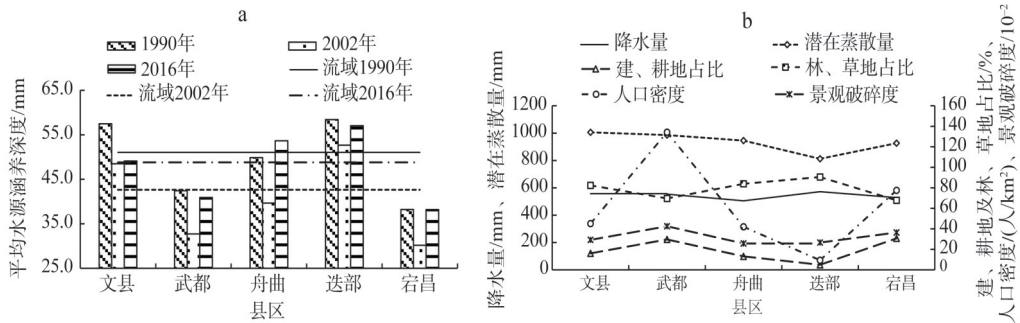


图2 1990年、2002年和2016年甘肃白龙江流域水源涵养服务时空分布特征

Fig. 2 The spatiotemporal distribution of WC in BLJW in 1990, 2002, 2016



注：各影响因素均为1990—2016年的多年平均值，下同。

图3 甘肃白龙江流域各县区水源涵养服务及其影响因素

Fig. 3 The distribution of WC in different counties and its influencing factors at BLJW

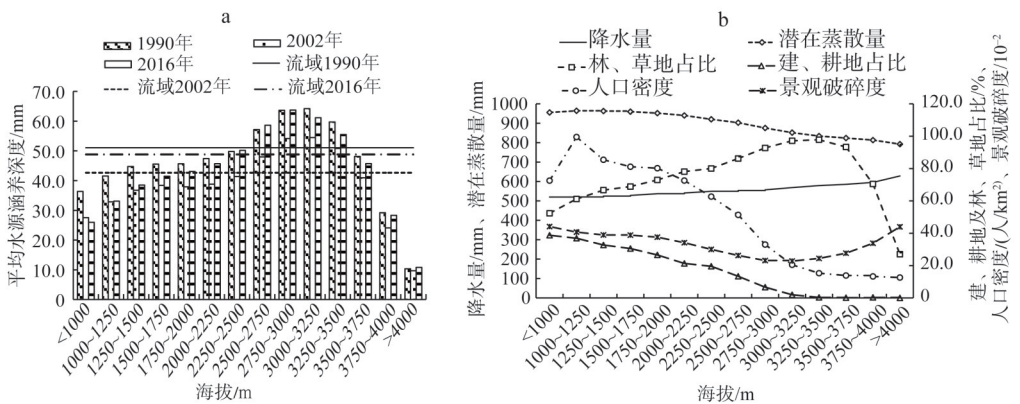


图4 甘肃白龙江流域各海拔段水源涵养服务及其影响因素

Fig. 4 The distribution of WC at different elevations and its influencing factors at BLJW

势(图4a)。具体而言,1500 m以下区段平均涵养量增长较快,1500~2500 m区段增长较为平缓,2500~3000 m区段增速回升,3000~3500 m区段快速下降,3500 m以上区段下降剧烈。其中,1990年、2002年高于流域平均涵养量的海拔段集中于2500~3500 m,到

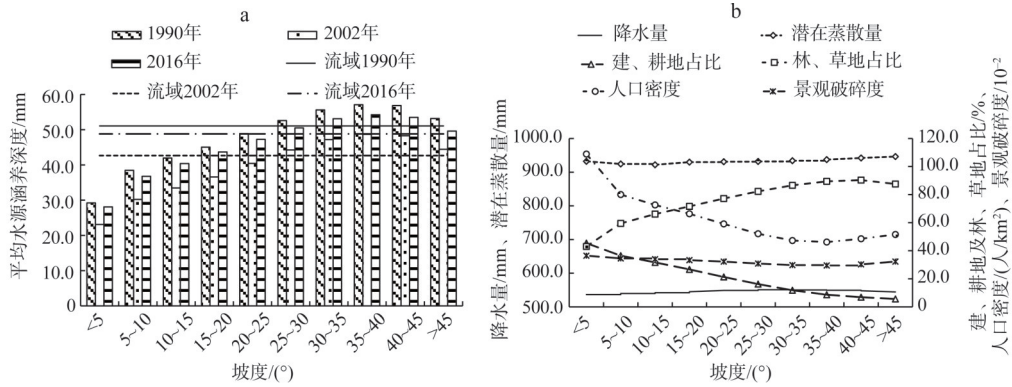


图5 甘肃白龙江流域各坡度段水源涵养服务及其影响因素

Fig. 5 The distribution of WC in different slopes and its influencing factors at BLJW

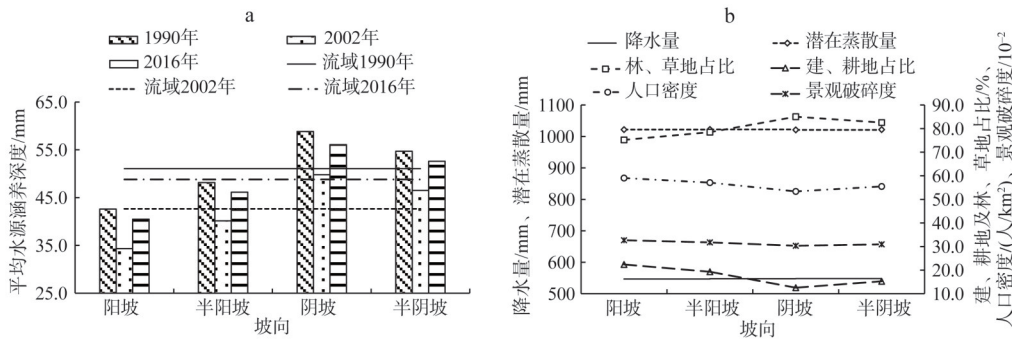


图6 甘肃白龙江流域各坡向水源涵养服务及其影响因素

Fig. 6 The distribution of WC in different aspects and its influencing factors at BLJW

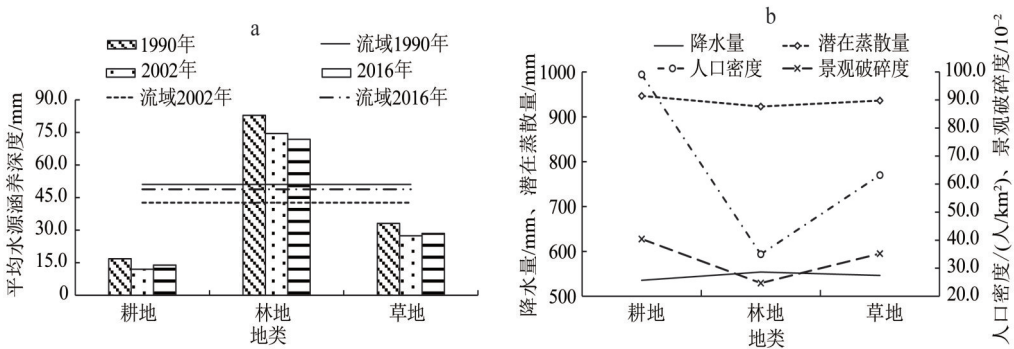


图7 甘肃白龙江流域各地类水源涵养服务及其影响因素

Fig. 7 The distribution of WC in different land use types and its influencing factors at BLJW

2016年高值区下降至2250 m。这种变化和高值分布与林、草地比例随海拔抬升变化趋势一致，同时与景观破碎度变化相反（图4b）。年际变化上，除1000 m以下区段逐年减小、2500~3000 m和4000 m以上区段2016年>1990年>2002年外，其余各区段的涵养量均表现为1990年>2016年>2002年，与流域的变化保持一致。

不同坡度上，流域各年份平均水源涵养量均以40°为界呈先增后降趋势（图5a）。具

体而言, 10°以下坡段增加显著, 10~40°坡段增长逐步减缓, 40°以上坡段平稳下降。其中, 25°以上坡段均高于各年份流域平均涵养量。这种变化趋势与降水和林、草地比例随坡度增大先增加后减少相一致, 与景观破碎度、人口密度变化相反, 10°以下坡段潜在蒸散量、人口密度和建、耕地比例均下降明显, 林、草地比例增加显著(图5b)。年际变化上, 各坡段涵养深度与流域的变化均表现为1990年>2016年>2002年。

对于不同坡向而言, 流域各年份平均水源涵养量均表现为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡, 其中, 前两个坡向的大于流域平均涵养量(图6a)。这种分布格局与各坡向的林、草地比例极为相似, 同时与各坡向的人口密度、景观破碎度和建、耕地比例分布相反(图6b)。年际变化上, 各坡向和流域涵养量均表现为1990年>2016年>2002年。

2.2.3 不同地类上平均水源涵养量

地类上, 各年份平均水源涵养量均表现为林地>草地>耕地, 其中, 林地的大于流域平均值(图7a)。这种分布差异与各地类的降水量呈正相关, 与人口密度、景观破碎度和潜在蒸散量呈负相关(图7b)。年际变化上, 除林地的逐年减少外, 耕地、草地的与流域涵养深度一致, 表现为1990年>2016年>2002年(图5a)。这可能与次生林(2002年的其他用地转为2016年的林地)主要分布于人类活动聚集和景观较为破碎的低山河谷区有关, 因为该区降水少, 但潜在蒸散较大(图4b); 同时, 相关研究表明与原生林相比, 次生林的土壤有机质含量低、土壤容重大, 土壤持水性能较弱^[28], 且次生林水源涵养量统计仅为67.16 mm, 也印证了林地水源涵养深度为何下降的原因。

2.3 流域水源涵养服务冷热点分析

1990—2016年, 流域水源涵养冷热点区在乡镇显著个数上虽有一定差异, 但热点区均分布于迭部大部、舟曲北部和流域东南部的林草区, 冷点区则均分布于宕昌的北部和南部以及武都中北部(图8)。近26年来, 一直为显著热点区(高值区)的乡镇集中在流域东南部的低山温湿丘陵和西北部的寒湿山地。该两区植被覆盖度高, 林下淋溶土极为发育, 人类农牧业生产活动低, 景观较为集聚(表2)。一直为显著冷点区(低值区)的乡镇集中于宕昌和武都的河流阶地、中低山缓坡梁和山间盆地, 该区较为温热, 且多为盖度较低的草地和耕地, 其下半淋溶土和钙层土较为发育; 同时受人类农牧业生产活动的影响, 景观较为破碎(表2)。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 1990—2016年, 甘肃白龙江流域多年平均水源涵养深度为47.50 mm, 并呈现先减后增的趋势。空间上, 其高值区分布于宕昌西部至舟曲中南部的流域中上游林区、文县的白水江南部山区和武都东南部的大团鱼河低山丘陵区; 低值区则集中于宕昌—舟曲—武都段人口密集的白龙江两岸、文县北部耕作区和迭部高山裸岩区。

(2) 流域平均水源涵养深度随海拔、坡度抬升呈先增后减的趋势; 其高值区分别出现在2500~3500 m和25~40°区段; 阴坡和半阴坡的水源涵养量大于阳坡和半阳坡; 林地的涵养量大于耕地、草地。

(3) 流域多年水源涵养高值区的乡镇集中于流域东南部的低山温湿丘陵和西北部的高寒湿润山地; 低值区的乡镇集中于宕昌和武都的河流阶地、中低山缓坡梁面和山间盆地。水源涵养与降水、NDVI呈正相关, 与潜在蒸散、用地强度、景观破碎度以及人口密

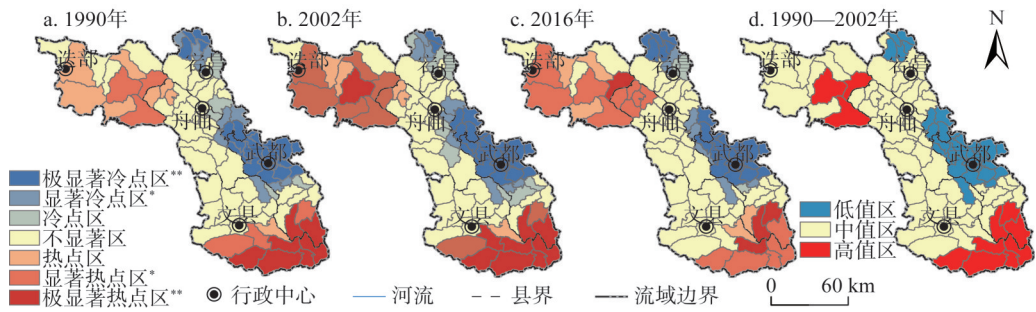


图8 甘肃白龙江流域水源涵养服务冷热点分布时空变化

Fig. 8 The spatiotemporal variation of hotspots and coldspots of WC at BLJW

表2 甘肃白龙江流域社会生态要素区域差异

Table 2 The regional differences of socio-ecological elements at BLJW

社会生态指标	流域	高值区		低值区		
		流域东南部	迭部东南部	武都中北部	宕昌北部	
水源涵养量/mm	48.80	59.44	55.65	29.10	22.02	
气候	降水/mm	549.45	583.26	575.65	523.41	514.29
	温度/C°	12.16	15.54	9.21	14.61	9.50
地形	高程/m	2323.21	1606.71	2934.34	1987.47	2554.57
	坡度/(°)	26.28	29.30	29.70	25.64	18.24
土壤类型(比例/%)	棕壤(29.96)	棕壤(47.85)	棕壤(37.38)	淋溶褐土(25.11)	黑土(59.08)	
	暗棕壤(17.78)	黄棕壤(25.56)	暗棕壤(31.95)	石灰性褐土(22.91)	淡黑钙土(22.77)	
自然	林地(53.12)	林地(76.22)	林地(56.20)	草地(47.33)	耕地(52.27)	
	景观(比例/%)	草地(29.81)	草地(12.48)	草地(35.34)	耕地(27.06)	草地(33.18)
植被覆盖度	ED	0.54	0.67	0.56	0.48	0.43
	SHDI	23.41	21.40	21.52	21.12	30.20
CONTAD	SHDI	0.88	0.68	0.91	0.97	0.96
	CONTAD	66.89	74.00	65.92	64.98	63.21
农牧业	人口密度	88.74	42.73	11.25	178.64	167.93
	发展/(人/km ²)	各乡镇农作物单产 ^a (t/km ²)	34.00	15.06	3.94	70.36
各乡镇载畜量(头/km ²)	各乡镇载畜量	66.64	41.44	63.73	109.57	51.75

注：表格中为2016年数据。

度呈负相关；流域及其内部高、低值区的水源涵养时空变化深受气候和下垫面特征的差异化影响，退耕还林有利于减缓气候变暖背景下水源涵养深度下降的速率。

3.2 讨论

生态系统服务功能显著的主导作用和效果只在特定的时空尺度上才展现出来^[29,30]，于是被人类获取和利用的那部分功能（即生态系统服务）也具有空间异质性。研究表明白龙江流域水源涵养服务主要集中于迭部、舟曲和文县的中高山阴陡坡林区，其时空分布是气候背景下人类活动改变土地利用/覆被格局的综合结果。

3.2.1 水源涵养的静态空间影响因素分析

相关研究表明水源涵养的空间差异与气候（降水和温度等）、下垫面性质（覆被和土

壤等)和社会要素(人口密度、经济和城市化水平等)有关^[12,31],地形则是通过影响自然和社会要素的梯度差异来改变水源涵养的分布格局。于是,此处从表2的土壤差异和表3的相关性进行水源涵养的静态空间异质性影响因素分析。

表3 甘肃白龙江流域水源涵养的静态影响因素

Table 3 The static influencing factors of WC at BLJW

年份	降水	潜在蒸散	用地强度	NDVI	景观破碎度	人口密度
1990	0.575**	-0.196	-0.839**	0.571**	-0.313**	-0.609**
2002	0.699**	-0.250*	-0.842**	0.859**	-0.305**	-0.485**
2016	0.189	-0.144	-0.938**	0.909**	-0.411**	-0.591**

注: *、**分别为在0.05、0.01水平(双侧)上显著相关,下同;受长时间尺度统计数据不完整和跨行政区统计口径不一致的影响,此处未对农牧业生产等情况做分析。

黄棕壤—棕壤—暗棕壤是在北亚热带、暖温至温凉湿润气候下常绿阔叶、落叶阔叶混交林至针阔叶混交林带发育的土壤,植被覆盖度高,根系发达,有较丰富的枯枝落叶或腐殖质层,土质疏松多孔、容重较低,土壤持水功能强。石灰性褐土—淋溶褐土区多分布于暖温带至温带湿润、半湿润的低山、河谷草灌带,成土母质为黄土和残积、堆积物;黑土—淡黑钙土区多处于缓坡丘陵区,成土母质为黄土状沉积物或坡积物,天然植被主要为灌草型。后两区土壤经垦殖和放牧等干扰后,植被盖度下降,土壤层因频繁踩踏而变得紧实,从而致使容重增大、孔隙度和有机质下降,最终导致土壤持水功能弱。

静态年份相关性表明水源涵养与降水和NDVI呈正相关,与潜在蒸散、用地强度、景观破碎度以及人口密度呈负相关。平均相关程度上,用地强度和NDVI的高于降水和潜在蒸散的,表明下垫面特征对水源涵养功能的影响程度更高^[14],这可能是因为用地强度和NDVI源于覆被类型,覆被类型直接影响其下的成土过程,且相关研究表明土壤层是生态系统涵养水源的主体^[32]。同时,降水的影响也同样大于潜在蒸散^[15]。年际变化上,水源涵养分别与用地强度和NDVI的相关性逐步增加,与景观破碎度和人口密度的相关性先降后增,与降水和潜在蒸散的则先增后减(表3)。值得注意的是,2002年水源涵养受土地利用/覆被格局的影响减弱,受气候的影响增强。这可能与土地利用变化引发的局部气候效应有关^[33,34],即毁林开荒在减少碳汇,提高大气CO₂的同时,降低了植被盖度和地表粗糙度,地表反射率和直接蒸发强度增加,叶面积指数和土壤有效含水量的降低导致蒸腾减弱,水汽向上通量小,最终导致大气湿度低,降水少;此外林、草地和水域向耕地的转变增加了感热和地面温度。地表增温和大气降水减少的同步效益致使该年份水源涵养下降显著。

3.2.2 基于要素模拟的影响因素分析

近26年来,流域年均降水量先降后增,但温度波动上升^[35,36](图9)。温度变化下,2002年和2016年流域水源涵养量分别增加了-13.49%和-4.53%;高值区分别增加了-12.11%和-19.37%;低值区分别增加了-21.24%和8.68%。降水影响下,流域涵养量分别增加了-12.46%和4.13%,高值区分别增加了-11.43%和-13.64%,低值区分别增加了-20.19%和21.69%。潜在蒸散影响下,流域涵养量分别增加了-1.02%和-9.28%,高值区分别增加了-0.67%和-5.73%,低值区分别增加了-1.05%和-13.00%(图10)。同时,1990—2002年林、草地面积总体缩减,耕地面积扩张,由于2002年以来退耕还林政策的

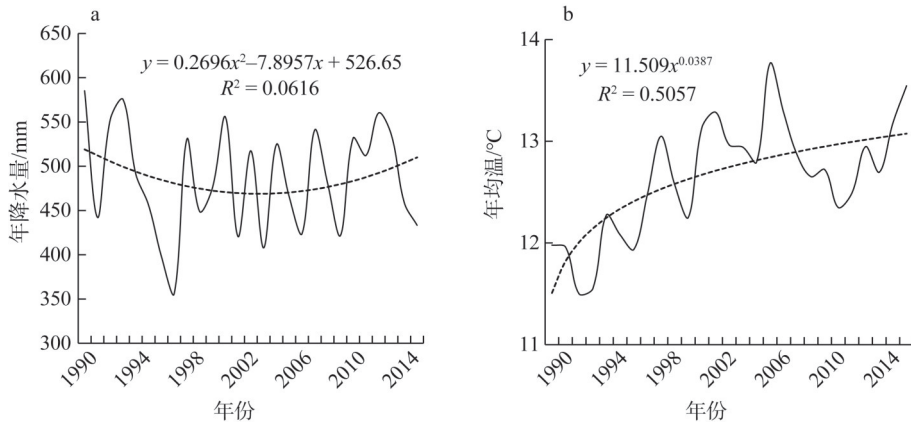


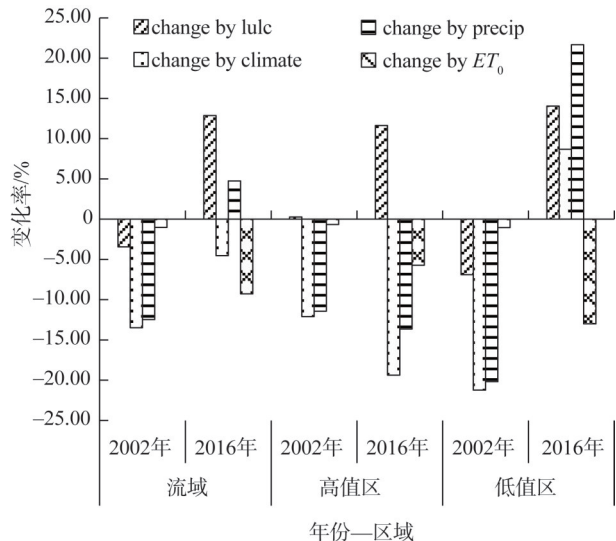
图9 甘肃白龙江流域年降水量与年均温变化

Fig. 9 The annual precipitation and average annual temperature change at BLJW

实施, 其景观破碎化2002年后先增后减, *ED*和*SHDI*先增后减, *CON-TAG*先减后增^[26]。土地利用影响下, 2002年和2016年流域水源涵养量分别增加了-3.44%和12.88%, 高值区分别增加了0.26%和11.64%, 低值区分别增加-6.90%和14.05% (图10)。就区域差异而言, 2002年水源涵养对气候和土地利用的响应均表现为低值区>流域>高值区; 2016年各区水源涵养对土地利用和潜在蒸散的响应都提高, 且流域和低值区对土地利用的响应超过气候, 高值区则相反 (图10)。就时段变化而言, 2002年前的开荒种地和景观破碎化都增加了生态脆弱性, 同时降水减少和气温增加也加剧了气候脆弱性, 水源涵养服务退化显著; 2002年后的退耕还林和破碎化减弱强化了流域生态安全, 降水也有所增加, 但气温持续升高弱化了水源涵养服务的改善过程 (图9)。

3.2.3 基于时段相关性和因子探测相结合的影响因素分析

流域的水文过程主要受下垫面的起伏变化和气候因素的影响, 因此, 水源涵养存在明显的时间变化。已有研究表明生态系统服务研究中“空间代替时间”的论述是不科学的, 只有静态年份和动态时段相结合的相关性研究才能真实反映生态过程和服务的时空变异^[37]。因此, 此处采用时段相关性识别方向和地理探测器评估程度相结合的方法对流域水源涵养时空变化的影响因素进行研究。



注: change by lulc为各年份水源涵养量基于前一年气象因子计算后与前一年涵养量的比较; change by climate (change by precip, change by ET_0)为各年份水源涵养量基于前一年气象因子(降水, 潜在蒸散)计算后与本年真实涵养量的比较。

图10 气象因子和土地利用对水源涵养的影响

Fig. 10 The effects of meteorological factors and land use on WC at BLJW

动态时段相关性显示1990—2002年水源涵养与降水显著正相关，与潜在蒸散、用地强度显著负相关；2002—2016年水源涵养与降水显著正相关，与用地强度、景观破碎度显著负相关。26年来，水源涵养分别与降水、景观破碎度的相关性呈增强态势，与其他四项因子呈减弱态势。

表4的相关性只能定性说明水源涵养变化的影响因素大小，同时表2和图10表明影响因子在流域各区具有差异性。因此，此处将表4中的影响因子分别在流域和高、低值区两个层面按Nature Break法分为五类，然后利用因子和交互探测探讨水源涵养的影响因素。

表4 甘肃白龙江流域水源涵养的动态影响因素

Table 4 The dynamic influencing factors of WC at BLJW

时段/年	降水变化	潜在蒸散变化	用地强度变化	NDVI变化	景观破碎度变化	人口密度变化
1990—2002	0.215*	-0.214*	-0.538**	-0.185	0.03	0.182
2002—2016	0.595**	0.042	-0.315**	0.163	-0.377**	-0.018

1990—2002年，对流域水源涵养变化影响较大的因子依次为用地强度变化(0.381)、降水变化(0.190)和潜在蒸散变化(0.118)；高值区依次为用地强度(0.718)、降水(0.527)和NDVI(0.512)的变化；低值区依次为用地强度、人口密度和降水(0.425、0.409和0.243)的变化。2002—2016年三区分别为降水、景观破碎度和用地强度(0.550、0.331和0.116)，降水、景观破碎度和NDVI(0.617、0.616和0.535)以及用地强度、潜在蒸散和NDVI(0.635、0.490和0.222)的变化。横向比较而言，两个时段的因子平均影响力均表现为高值区(两个时段依次为0.402、0.511) > 低值区(0.254、0.294) > 流域(0.141、0.209)，且后一时段的平均影响力较大(图11)。在实际生态过程中，由于各地区不同因子间的复杂性和交互性导致水源涵养存在空间差异。且从进一步的因子交互探测结果中也表明双因子交互对水源涵养变化均呈现出协同增强作用。其结果均为非线性增强或双因子增强，其中双因子增强作用的因子对数分别为：高值区(依次为8、14) > 低值区(均为5) > 流域(1、3)。

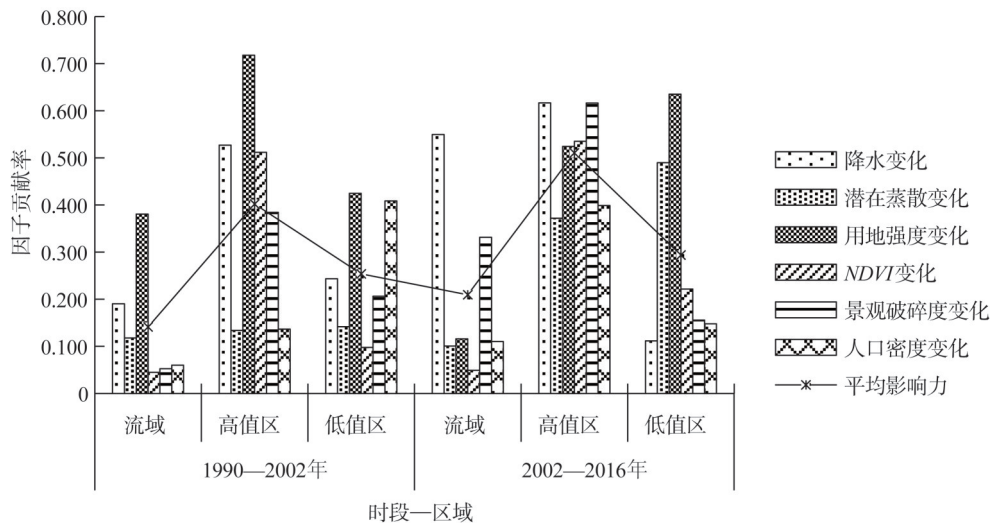
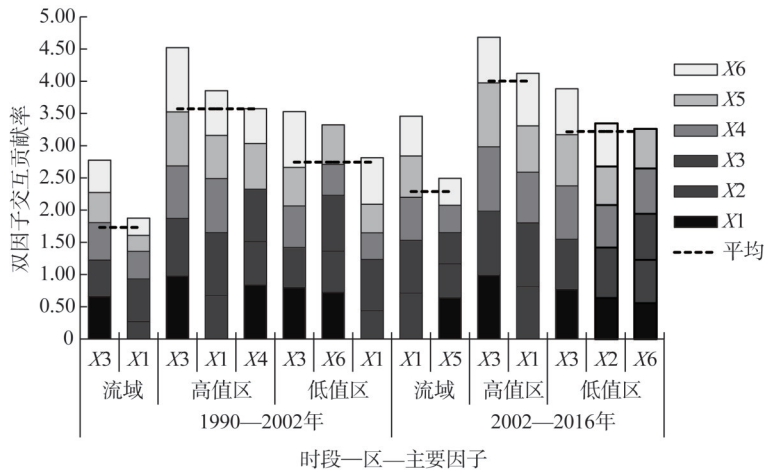


图11 流域及其内部分区单一因子贡献率

Fig. 11 The contribution rate of each factor in the watershed and inner zones at BLJW

就双因子交互作用, 1990—2002年流域最大交互因子为用地强度 \cap 降水变化(0.663), 随后依次为用地强度分别与 $NDVI$ (0.581)、潜在蒸散(0.561)、人口密度(0.501)和景观破碎度(0.468)的变化交互; 高值区的为用地强度分别与人口密度(0.998)、降水(0.977)、潜在蒸散(0.895)和破碎化(0.839)的变化交互, 以及 $NDVI$ \cap 降水变化(0.838); 低值区则为用地强度分别与人口密度(0.0.867)、降水(0.798)和 $NDVI$ (0.645), 以及人口密度分别与降水(0.723)和潜在蒸散(0.640)的变化交互(图12)。2002—2016年流域依次为降水与用地强度、潜在蒸散、 $NDVI$ 、破碎化和人口密度间的变化交互(交互力分别为0.818、0.712、0.668、0.641和0.618); 高值区分别为用地强度与 $NDVI$ 、潜在蒸散、破碎化和降水, 以及人口密度与降水间的变化交互(分别为0.999、0.995、0.990、0.989和0.816); 低值区依次为用地强度与 $NDVI$ 、破碎化、潜在蒸散、降水和人口密度间的变化交互(分别为0.827、0.793、0.781、0.769和0.714)。



注: X1~X6依次为降水、潜在蒸散、用地强度、 $NDVI$ 、景观破碎度和人口密度的变化

图12 流域及其内部分区双因子交互贡献率

Fig. 12 The contribution rate of two-factor interactive in the watershed and inner zones at BLJW

就单个因子与其他五项因子的综合作用, 1990—2002年流域平均影响力为1.732, 其中高于综合平均影响力分别为用地强度综合(2.774)、降水综合(1.875); 高值区高于综合平均影响力(3.572)的为用地强度综合(4.521)、降水综合(3.853)和 $NDVI$ 综合(3.574); 低值区高于综合平均影响力(2.744)的为用地强度综合(3.529)、人口密度综合(3.324)和降水综合(2.814)。2002—2016年三区综合平均影响力依次为2.288、4.002和3.215, 各区高于综合影响力的分别为降水和破碎化综合(分别为3.457、2.493)、用地强度和降水综合(4.683、4.123)以及用地强度、潜在蒸散和人口密度综合(3.884、3.341和3.255)。

综上所述, 水源涵养的时空变化既体现出流域社会生态过程全局一致性, 同时在局部又存在差异性。1990—2002年用地强度变化对流域及其内部高低值区的水源涵养变化影响均较大体现了流域整体相似性; 但双因子交互关系、单因子与其他因子交互的结果在各区间表现出差异, 相较于流域, 高值区的 $NDVI$ 综合较为突出, 低值区人口密度综合作用最为突出, 这表明流域水源涵养变化的空间异质性主要受区域差异影响。

参考文献(References):

- [1] MA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-being*. Washington D C: Island Press, 2005.
- [2] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196. [LYU Y H, HU J, SUN F X, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5191-5196.]
- [3] ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.
- [4] FERRAZ S F B, LIMA W DE P, RODRIGUES C B. Managing forest plantation landscapes for water conservation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 301: 58-66.
- [5] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676. [BAO Y B, LI T, LIU H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in Northern Shaanxi province by InVEST model. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 664-676.]
- [6] 黄蓉, 张建梅, 林依雪, 等. 新安江上游流域径流变化特征与归因分析. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1771-1781. [HUANG R, ZHANG J M, LIN Y X, et al. Variation of streamflow and its drivers in Xin'an River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1771-1781.]
- [7] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462. [GONG S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462.]
- [8] MARQUÈS M, BANGASH R F, KUMAR V, et al. The impact of climate change on water provision under a low flow regime: A case study of the ecosystem services in the Francoli River Basin. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 263: 224-232.
- [9] PESSACG N, FLAHERTY S, BRANDIZI L, et al. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Science of The Total Environment*, 2015, 537: 225-234.
- [10] 尹云鹤, 吴绍洪, 李华友, 等. SRES情景下青藏高原生态功能保护区水源涵养功能的变化研究. *资源科学*, 2013, 35(10): 2003-2010. [YIN Y H, WU S H, LI H Y, et al. Water conservation function changes in ecological reserves on the Tibetan Plateau under SRES scenarios. *Resources Science*, 2013, 35(10): 2003-2010.]
- [11] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价. *地理科学*, 2016, 36(4): 603-611. [LIU L L, CAO W, SHAO Q Q. Water conservation function of forest ecosystem in the Southern and Northern Pan River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 603-611.]
- [12] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 等. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. *地理科学*, 2016, 36(10): 1546-1554. [CHEN S S, LIU K, BAO Y B, et al. Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo city. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1546-1554.]
- [13] 陈丽, 郝晋珉, 陈爱琪, 等. 基于二元水循环的黄淮海平原耕地水源涵养功能研究. *生态学报*, 2017, 37(17): 5871-5881. [CHEN L, HAO J M, CHEN A Q, et al. Study on the water conservation function of cultivated land based on dualistic water cycle in Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5871-5881.]
- [14] 俞佳骏, 余树全, 梁立成, 等. 浙江省丽水市莲都区水源涵养功能动态变化及发展趋势. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(2): 189-198. [YU J J, YU S Q, LIANG L C, et al. Dynamic changes and development of water retention in Liandu district. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(2): 189-198.]
- [15] 张福平, 李肖娟, 冯起, 等. 基于InVEST模型的黑河流域上游水源涵养量. *中国沙漠*, 2018, 38(6): 1321-1329. [ZHANG F P, LI X J, FENG Q, et al. Spatial and temporal variation of water conservation in the upper reaches of Heihe River Basin based on InVEST model. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(6): 1321-1329.]
- [16] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的白龙江流域水源供给服务时空分异. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1337-1347. [XIE Y C, GONG J, QI S S, et al. Spatiotemporal variation of water supply service in Bailong River Watershed based on InVEST model. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1337-1347.]
- [17] 柳冬青, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因素. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 98-103. [LIU D Q, GONG J, ZHANG J X, et al. Spatiotemporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Bailongjiang Watershed in Gansu province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 98-103.]
- [18] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.

- [19] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 等. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. 生态学报, 2018, 38(13): 4637-4648. [WANG Y C, ZHAO J, FU J W, et al. Quantitative assessment of water conservation function and spatial pattern in Shiyang River Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4637-4648.]
- [20] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系: 以甘肃白龙江流域为例. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1278-1288. [GONG J, LIU D Q, GAO B L, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang Watershed in Gansu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1278-1288.]
- [21] 柳冬青, 张金茜, 李红瑛, 等. 基于地理探测器的流域土壤磷流失影响因素分析. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4814-4822. [LIU D Q, ZHANG J X, LI H Y, et al. Impact factors of soil phosphorus loss in watershed based on geographical detector. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12): 4814-4822.]
- [22] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. 生态学报, 2019, 39(3): 823-834. [WANG Z Z, ZHANG L W, LI X P, et al. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 823-834.]
- [23] WANG J F, HU Y. Environmental health risk detection with Geodetector. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 33: 114-115.
- [24] 柳冬青. 流域生态系统服务时空权衡与协同关系研究. 兰州: 兰州大学, 2019. [LIU D Q. Spatiotemporal tradeoff and synergy of watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed in Gansu, Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]
- [25] GORDON L J, ENFORS E I. Land degradation, ecosystem services and resilience of smallholder farmers in Makanya Catchment, Tanzania. *Conserving Land*, 2008, 6: 33-50.
- [26] 张金茜, 柳冬青, 巩杰, 等. 流域景观破碎化对土壤保持服务的影响研究: 以甘肃白龙江流域为例. 资源科学, 2018, 40(9): 1866-1877. [ZHANG J X, LIU D Q, GONG J, et al. Impact of landscape fragmentation on watershed soil conservation service: A case study on Bailongjiang Watershed of Gansu. *Resources Science*, 2018, 40(9): 1866-1877.]
- [27] 柳冬青, 张金茜, 巩杰, 等. 陇中黄土丘陵区土地利用强度—生态系统服务—人类福祉时空关系研究: 以安定区为例. 生态学报, 2019, 39(2): 637-648. [LIU D Q, ZHANG J X, GONG J, et al. Spatial and temporal relations among land-use intensity, ecosystem services, and human well-being in the Longzhong Loess Hilly Region: A case study of the Anding district, Gansu. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 637-648.]
- [28] 文志, 赵赫, 刘磊, 等. 海南土地利用变化对土壤水源涵养功能的影响. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4025-4033. [WEN Z, ZHAO H, LIU L, et al. Effects of land use changes on soil water conservation in Hainan Island, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12): 4025-4033.]
- [29] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的尺度特征. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1432-1437. [ZHANG H F, OUYANG Z Y, ZHENG H. Spatial scale characteristics of ecosystem services. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1432-1437.]
- [30] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681. [FU B J, XU Y D, LYU Y H. Scale characteristics and coupled research of landscape pattern and soil and water loss. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7): 673-681.]
- [31] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近 15 a 江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2453-2462. [GU Z M, JIN X B, SHEN C Z, et al. Variation and influence factors of water conservation service function in Jiangsu province from 2000 to 2015. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(11): 2453-2462.]
- [32] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能. 水土保持学报, 2018, 32(1): 210-217. [MA G F, MANSUR S, ZHANG X Q. Water conservation function of different vegetation types in the Upper Tailan River in Mount Tumor Nature Reserve. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 210-217.]
- [33] 华文剑, 陈海山, 李兴. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1025-1036. [HUA W J, CHEN H S, LI X. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(9): 1025-1036.]
- [34] 闫鸣. 土地覆盖与土地利用变化对地表气温的影响与反馈. 南京: 南京信息工程大学, 2016. [YAN M. Effects and feedbacks of land cover and land use change on surface air temperature. Nanjing: Nanjing University of Information

Science & Technology, 2016.]

- [35] 张秀云, 姚玉璧, 王润元. 白龙江流域气候变化及其对水资源的影响. 资源科学, 2009, 31(8): 1315-1320. [ZHANG X Y, YAO Y B, WANG R Y. The impact of climate change on water resources in Bailong River Valley. Resources Science, 2009, 31(8): 1315-1320.]
- [36] 张晓晓. 白龙江中上游水文气象要素变化特征分析及径流影响因素研究. 兰州: 兰州大学, 2014. [ZHANG X X. Variation characteristics analysis of hydrometeorological elements and affecting factors of runoff in the middle-upper reaches of Bailong River. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]
- [37] LUO Y, LYU Y H, FU B J, et al. Half century changes of interactions among ecosystem services driven by ecological restoration: Quantification and policy implications at a watershed scale in the Chinese Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2019, 651: 2546-2557.

Spatiotemporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang Watershed of Gansu

LIU Dong-qing, CAO Er-jia, ZHANG Jin-xi, GONG Jie, YAN Ling-ling

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education)/College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Bailongjiang Watershed is an important area of water conservation in the upper reaches of the Yangtze River, with great significance for maintaining the ecological balance of the watershed and promoting regional sustainable development. Taking the Bailongjiang Watershed in Gansu as an example, we used the InVEST water conservation assessment model based on parameter localization to analyze the multi-scale spatiotemporal change of water conservation in the watershed from 1990 to 2016 and its influencing factors. The results showed that the average annual water conservation depth of the watershed was 47.50 mm, with a trend of decreasing first and then rising. In terms of spatial distribution, the high value areas were mainly concentrated in the steep overcast forest area of middle-high mountain in Wenxian, Diebu and Zhouqu (the conservation depth of the three counties, 2500-3500 m altitude section, shaded and semi-shaded slopes, slope section above 25° and the forest land was higher than the average conservation depth of the watershed). The low value areas were mainly distributed in the gentle apricus farming and pastoral areas of middle-low mountain in Tanchang and Wudu (the average conservation depth in the two counties, below 2500 m elevation, sunny slope and semi-sunny slope, below 25° slope, cropland and grassland was lower than the watershed). Under the climatic background, the spatial difference of land use/cover pattern driven by human activities was an important factor affecting the spatiotemporal change of water conservation. Returning cropland to forest is of great significance in slowing down the decline of water conservation depth in the context of climate warming.

Keywords: water conservation; spatiotemporal pattern; InVEST model; Bailongjiang Watershed of Gansu