

# 秦岭生态屏障产水服务时空演变特征及驱动要素

王晓峰<sup>1,2</sup>, 符鑫鑫<sup>3</sup>, 楚冰洋<sup>3</sup>, 李月皓<sup>3</sup>, 延雨<sup>3</sup>, 冯晓明<sup>4</sup>

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710064; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710064;

3. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 4. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 秦岭是我国重要的“中央水塔”, 是南水北调的重要水源地。基于 InVEST 模型评估 2000—2018 年秦岭地区产水服务, 分析其时空演变特征, 利用相关性分析和地理加权回归方法 (GWR) 探究不同因素对秦岭地区产水服务变化的影响。结果表明: 秦岭地区多年平均产水量为 235.16 mm, 19 年间产水量呈现微弱下降趋势, 产水量在空间上表现为由南部向北减少的特点。秦岭地区产水量波动程度和变化趋势都较弱, 产水服务整体比较稳定。各因素对产水量的影响具有明显的空间异质性, 降水主导的范围最大 (33.18%), 且集中分布于产水量较多的秦岭南侧。其次为 NPP (17.90%) 和实际蒸散量 (16.71%), 两者在中北部地区是主要影响因素。研究结果对促进区域生态安全和可持续发展具有一定的指导意义。

**关键词:** 生态系统服务; 产水量; 时空异质性; 驱动因素; 秦岭屏障区

产水服务是一种重要的生态系统服务, 对于维持生态系统稳定以及提高人类福祉具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。产水服务直接影响区域水资源的整体水平, 会对区域生态系统、农业、工业、人类消费、水力发电、渔业和娱乐活动产生重要影响<sup>[5]</sup>, 同时, 区域自然气候和社会经济等要素也制约着区域产水服务的时空分布<sup>[6,7]</sup>。秦岭地区是我国重要的生态屏障, 也是我国南北方的分界线和地理格局形成和变化的控制枢纽。秦岭具有丰富的水力资源, 构成我国重要的水源涵养地和南水北调水源地, 是我国重要的“中央水塔”。因此, 开展产水服务研究对平衡该地区社会经济发展和生态安全非常重要, 也为区域水资源的合理开发及可持续利用提供理论和技术支撑。

近年来, 国内外学者对不同尺度的多种生态系统的产水服务进行了研究。如 Fan 等<sup>[8]</sup>基于 SWAT 模型在日本北海道流域的模拟结果发现, 气候变化比土地利用变化在增加产水量方面起的作用更大。Ronald 等<sup>[9]</sup>利用多因素 Logistic 回归分析对美国东南部湿地产水量的驱动因素进行探究, 发现森林年龄、造林维护和森林干扰等对该地产水量具有驱动作用。吴建等<sup>[10]</sup>利用结构方程模型探讨了东北地区产水量时空变化, 得出降水量是东北产水量变化的主要因素。孙小银等<sup>[11]</sup>采用 InVEST 模型模拟南四湖流域产水量, 并探讨了自然和社会因素对其空间格局动态变化的影响。包玉斌等<sup>[12]</sup>基于 InVEST 水源涵养功能评价模块, 研究了退耕还林还草工程背景下对黄土高原地区水源涵养对土地利用变化的响应。宁亚洲等<sup>[13]</sup>利用 InVEST 模型, 研究秦岭地区 (陕西段) 水源涵养功能的时空变化, 并分析气候和土地利用类型变化对水源涵养功能变化的影响。

收稿日期: 2020-10-08; 修订日期: 2021-02-07

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0405); 国家重点研发计划 (2018YFC0507300)

作者简介: 王晓峰 (1977-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授, 主要从事生态遥感方面的教学与科研。

E-mail: wangxf@chd.edu.cn

上述研究中,针对产水量影响因素的探究多从全局性出发<sup>[8-13]</sup>,忽略了影响因素的空间异质性,不同地区驱动因子对产水服务的影响存在着明显的空间差异,这使得全局分析存在一定的局限,难以充分表征驱动因子对产水的影响。地理加权回归模型(GWR)是对传统回归模型的空间扩展<sup>[14,15]</sup>,能有效描述产水服务影响因素的空间非平稳特征,从而揭示产水服务驱动的空间异质性<sup>[16,17]</sup>。因此,本文以秦岭为研究区,基于InVEST模型原理对研究区2000—2018年的产水服务进行估算,探究产水服务时空分异特征,结合相关性分析和GWR揭示各影响因素的作用强度及空间异质性,识别不同区域的主导驱动因素,为秦岭地区制定水资源保护措施提供合理的科学指导,以期保障区域及全国水资源安全。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

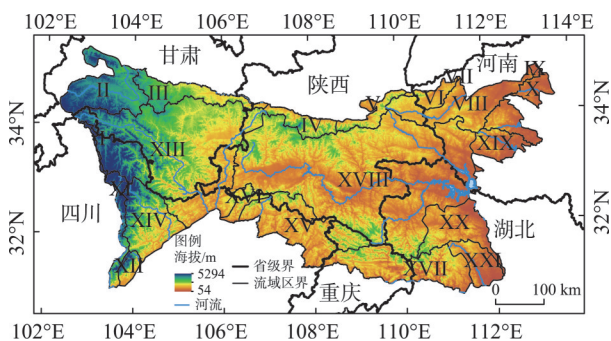
秦岭地区(30°38′~35°31′N, 102°18′~113°44′E),海拔约为54~5294 m,总面积约28万km<sup>2</sup>。秦岭地区横跨暖温带和亚热带两个气候区,是气候的过渡地带。秦岭以北地区是暖温带大陆性季风气候区,年均温约为13.3℃,年降雨量在600~700 mm之间,主要集中在夏秋季节。南部地区是亚热带湿润季风气候区,年降雨量丰富,约800~1700 mm,空间上降水量从南至北逐渐减少。研究区多山地地形,因此气候也表现出明显的垂直特征。秦岭山脉具有丰富的水力资源,秦岭地区南面有长江的重要支流嘉陵江、汉江。汉江是长江的第一大支流,发源于秦岭西部,顺着秦岭向东1000 km流域都在秦岭南麓范围,在秦岭北麓有渭河从甘肃一直相伴至潼关汇入黄河。

研究区生态环境复杂多样,需综合考虑其地形、气候与植被等多种因素,这是导致产水服务空间分异的主要原因。不同流域有着不同的地形和气候水文特点,为研究不同流域产水的时空异质性和驱动力,本文依据全国三级流域划分方案将研究区划分为21个三级流域区(图1)。

### 1.2 数据来源及预处理

本文所使用的主要数据包括:气象数据、归一化植被指数(NDVI)数据、植被净第一性生产力(NPP)数据、土地利用数据、全国三级流域数据、土壤数据、水系数据和数字高程模型(DEM)数据等。

气象数据包括研究区逐日的气压、相对湿度、太阳辐射、风速、日照时数、最高温度和最低温度,来自中国气象数据共享网(<http://data.cma.gov.cn/>)。



注: I—河源至玛曲, II—大夏河与洮河, III—渭河宝鸡峡以上, IV—渭河宝鸡峡至咸阳, V—渭河咸阳至潼关, VI—龙门至三门峡干流区间, VII—三门峡至小浪底区间, VIII—伊洛河, IX—小浪底至花园口干流区间, X—王蚌区间北岸, XI—青衣江和岷江干流, XII—沱江, XIII—广元昭化以上, XIV—涪江, XV—渠江, XVI—广元昭化以下干流, XVII—宜宾至宜昌干流, XVIII—丹江口以上, XIX—唐白河, XX—丹江口以下干流, XXI—宜昌至武汉左岸, 下同。

图1 研究区流域概况

Fig. 1 Location and basin of the study area

cma.cn/), 采用专业的气象插值软件 ANUSPLIN 批量插值<sup>[18]</sup>, 得到研究区日尺度的分辨率为 1 km 的气候栅格数据, 主要用来计算潜在蒸散发和年降水数据。归一化植被指数 (NDVI), 主要包括 2000—2018 年逐月的 NDVI 数据, 下载自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 采用最大合成法提取每年 12 月中的 NDVI 最大值, 从而合成逐年 NDVI 数据。植被第一性生产力数据 (NPP) 采用 CASA 模型计算, 通过植物的光合有效辐射和实际光能利用率两个因子来表示, 得到空间分辨率 1 km 的 NPP 数据。土地利用数据、土壤数据 (土壤质地、类型和厚度等)、全国三级流域数据、水系数据和数字高程模型 (DEM) 等均下载自于资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 其中土地利用数据包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年共五期数据, 空间分辨率为 1 km。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 基于 InVEST 模拟秦岭地区产水服务

InVEST 模型具有输入数据量少、导出数据量大、对抽象生态系统服务功能进行定量分析等优点<sup>[19]</sup>。使之成为当前产水服务评估的重要手段。其产水模块基本原理为:

$$WY_{(x)} = P_{(x)} - ET_{(x)} \quad (1)$$

式中:  $WY_{(x)}$  为栅格单元  $x$  产水量 (mm);  $P_{(x)}$  为栅格单元  $x$  的降水量 (mm);  $ET_{(x)}$  为栅格单元  $x$  的实际蒸散量 (mm)。

实际蒸散发是通过 Zhang 等<sup>[20]</sup>提出的经验模型来实现。计算公式如下:

$$ET_{(x)} = \frac{P_{(x)} \left( 1 + PET_{(x)} / P_{(x)} \right)}{1 + \omega_{(x)} \left( PET_{(x)} / P_{(x)} \right) + \left( PET_{(x)} / P_{(x)} \right)^{-1}} \quad (2)$$

式中:  $\omega_{(x)}$  因子为植物水利用系数, 无量纲, 根据前人研究<sup>[21,22]</sup>, 该因子取值在林地 2, 在草地 0.5, 在灌木为 1, 在耕地为 0.5, 在建设用和未利用地均为 0.1;  $PET_{(x)}$  为栅格单元  $x$  的潜在蒸散量 (mm), 根据 Penman-Monteith 公式<sup>[22]</sup>计算。

#### 1.3.2 趋势分析和变异系数

线性回归分析法是一种常见的趋势分析方法, 具有过程简单、应用广泛、易于解释等优点<sup>[23]</sup>, 该方法可用于产水服务逐像元变化趋势分析, 公式如下:

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times WY_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n WY_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中:  $WY_i$  为第  $i$  年的产水量 (mm);  $n$  为累计年数;  $i$  为年序号;  $k$  为产水量变化趋势的斜率。当  $k > 0$  时, 产水量呈增加趋势; 反之, 产水量呈减少的趋势。显著性检验置信度为 95%。

变异系数反映了数据的波动特征, 变异系数是标准差与平均值的比值, 该方法常用于衡量数据的波动性<sup>[24]</sup>。以此来研究产水服务的空间波动特征, 其计算公式为:

$$c_v = \frac{S}{|\bar{x}|} \quad (4)$$

式中:  $c_v$  为变异系数;  $S$  为标准差;  $\bar{x}$  为平均值。变异系数越小, 表明产水量的年际变异越小, 即波动程度越小; 反之, 变异系数越大, 表明产水量的年际变异越大, 即波动程度越大。

### 1.3.3 地理加权回归模型

地理加权回归 (GWR) 是传统线性回归模型的空间扩展, 常用于研究地理空间数据之间的关系<sup>[25]</sup>。传统的线性回归模型忽视了空间数据中所包含的位置信息, 从而对变量间关系的局部特性不能有效地表达<sup>[14]</sup>。GWR 模型允许模型局部回归而非全局回归, 对探索空间非平稳性有很好的效果<sup>[26]</sup>。模型结构如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中:  $y_i$  表示样本  $i$  的产水量变化的拟合值;  $(u_i, v_i)$  是第  $i$  个样本空间单元的地理中心坐标;  $\beta_0(u_i, v_i)$  是第  $i$  个样本的常数项估计值;  $\beta_k(u_i, v_i)$  是连续函数在  $i$  样本空间单元的值, 是关于地理位置的函数;  $x_{ik}$  是第  $k$  个自变量在样本  $i$  的值;  $\varepsilon_i$  指服从均值为零的独立正态分布的误差。

## 2 结果分析

### 2.1 产水服务时空特征分析

#### 2.1.1 年际变化

秦岭地区多年平均产水量为 235.16 mm, 多年平均产水总量为  $6.73 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。从总体趋势来看, 秦岭地区产水服务出现轻微下降趋势。2003 年产水量最大, 为 470.17 mm。2007 年产水量最小, 为 75.57 mm。分段统计更能揭示产水量变化的真实特征。将数据按照每 6 年一段进行分析 (图 2), 产水服务在不同时期的变化趋势有明显差异, 2000—2006 年有轻微下降趋势, 下降速率为 1.25 mm/a。2006—2012 年产水服务有明显的上升趋势, 增加速率为 35.92 mm/a。2012—2018 年上升趋势较缓, 增加速率为 7.32 mm/a。产水在不同年份间的变化趋势显著性水平都较低 ( $P > 0.05$ ), 表示产水服务本身变化趋势不明显。

#### 2.1.2 空间分布特征

从 2000—2018 年研究区多年平均产水量的空间分布来看 (图 3a), 秦岭地区产水量整体呈现南高北低的格局, 即高值区 (400~1200 mm) 集中分布于研究区中南部, 低值区 (0~200 mm) 主要分布于研究区东北和西北部。在空间上的分布具有明显的“阶梯性”分布特点, 由秦岭南部向北逐渐减少, 具有明显的空间分异性。

研究区各流域的产水量存在明显差异 (表 1), 其中沱江流域产水量最高 (632.97 mm), 渭河宝鸡峡附近的流域产水量最低 (57.06 mm)。广元昭化以上、渭河宝鸡峡以上、渭河咸阳至潼关、龙门至三门峡干流区间、三门峡至小浪底区间和大夏河与洮河这六个流域产水量较低 (<100 mm), 多年平均降水大约为 650~700 mm, 平均海拔高度差异较大, 土地利用类型中耕地占比大约为 10%~20%, 林地占比大约为 35%~50%, 草地占比大约为 30%~50%。伊洛河、小浪底至花园口干流区间、王蚌区间北岸、丹江口以上、唐

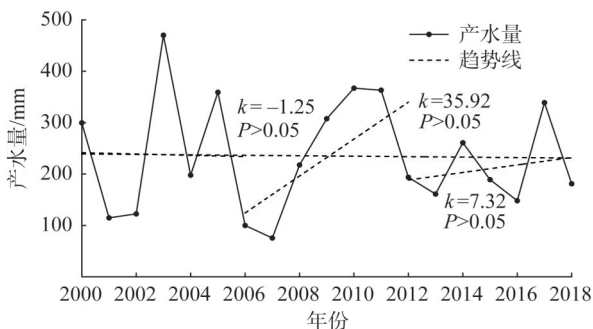


图2 2000—2018年秦岭地区产水服务年际变化

Fig. 2 Variations in water yield in Qinling Mountains from 2000 to 2018



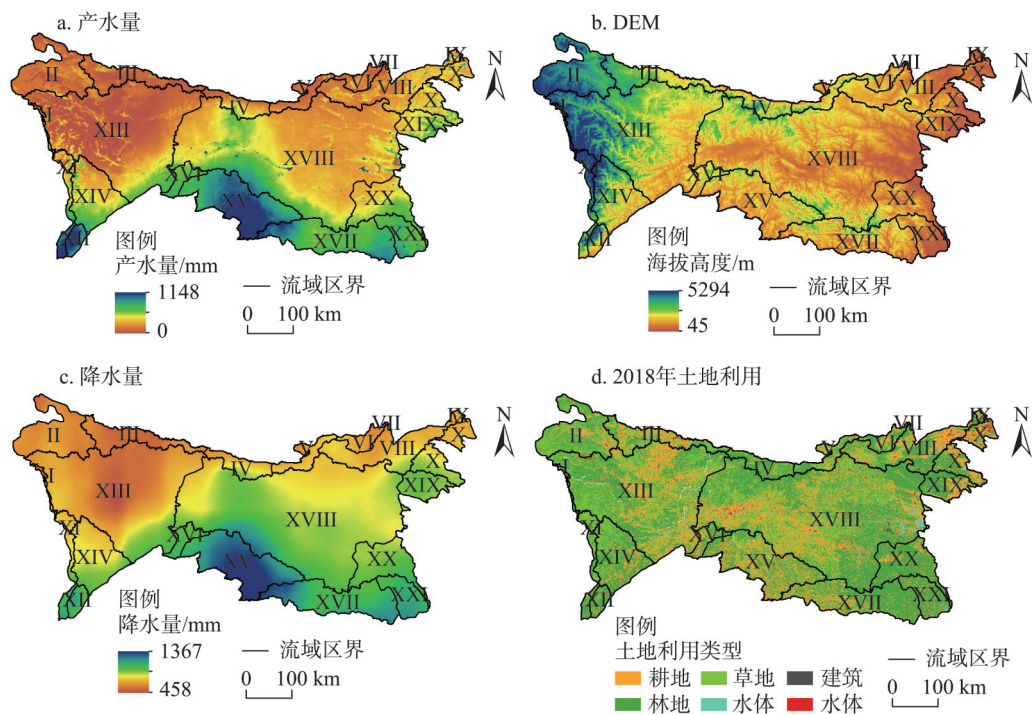


图3 秦岭多年平均产水服务与基础地理数据

Fig. 3 Annual average water yield and basic geographic data in Qinling Mountains

白河和丹江口以下干流等流域产水量中等水平（100~300 mm），多年平均降水大约为670~900 mm，平均海拔大约为500~1000 m，个别流域超过2000 m，土地利用类型中耕地占比约为10%~35%，林地占比约为40%~80%，草地占比大约在30%以下。沱江、渠江、广元昭化以下干流、宜宾至宜昌干流、青衣江和岷江干流这五个流域产水量较高（>300 mm），多年平均降水大约为850~1200 mm，平均海拔分布在1200~3000 m，土地利用类型中耕地占比约在10%~30%，林地占比约在45%~70%，草地占比约10%~20%。

秦岭地区产水服务的分布格局和降水基本一致（图3c），降水量较高的区域，如沱江、渠江等流域，其产水量也相对较高。海拔对于产水量的空间分布也有明显的影响，产水量较高的流域主要集中分布在中高海拔的区域（图3b），如沱江、青衣江和岷江干流等，但是海拔对产水的影响不是绝对的，渭河宝鸡峡以上、大夏河与洮河等流域，平均海拔高度大于2000 m，但是产水量很低。秦岭地区土地类型以耕地、林地和草地为主（图3d），在降水条件相同的条件下，流域下垫面对产水的影响也比较明显，耕地、草地的截留效果相对较好，林地产水效果相对差，如青衣江和岷江干流、丹江口以上等流域。总体来看，秦岭地区产水量高值区更侧重于向高降水、高海拔和耕地、草地占比大的流域分布，产水量低值区相反。

2.1.3 空间变化趋势及波动特征

根据变化趋势结果及显著性水平，将研究区产水服务的变化趋势划分为四类：显著上升（ $k>0, P<0.05$ ）、未显著上升（ $k>0, P>0.05$ ）、未显著下降（ $k<0, P>0.05$ ）和显著下降（ $k<0, P<0.05$ ）。

表1 秦岭各流域平均海拔、降水、下垫面占比和产水量

Table 1 Average elevation, precipitation, proportion of underlying surface and water yield of each basin in Qinling Mountains

流域	平均海拔/m	平均降水/mm	耕/林/草地占比/%	平均产水量/mm
河源至玛曲	3742.05	687.28	0/6/90	141.15
大夏河与洮河	3153.08	613.09	11/35/51	77.65
渭河宝鸡峡以上	2084.54	564.90	31/24/42	57.06
渭河宝鸡峡至咸阳	1702.31	743.37	6/65/29	166.12
渭河咸阳至潼关	1371.40	699.94	18/41/39	85.87
龙门至三门峡干流区间	1083.33	653.91	20/49/31	95.23
三门峡至小浪底区间	878.91	596.95	23/36/40	59.14
伊洛河	882.27	718.47	32/45/19	149.02
小浪底至花园口干流区间	341.31	675.06	34/23/39	185.51
王蚌区间北岸	499.01	774.53	43/38/13	238.41
青衣江和岷江干流	3123.93	849.83	4/43/52	380.18
沱江	2061.77	1019.32	11/71/16	632.97
广元昭化以上	2032.98	653.49	20/36/42	93.18
涪江	2080.98	805.42	12/57/30	274.00
渠江	1134.33	1217.35	32/49/19	590.96
广元昭化以下干流	1322.71	983.36	23/56/20	401.45
宜宾至宜昌干流	1069.97	1069.20	21/68/10	459.57
丹江口以上	993.80	859.18	22/45/31	231.00
唐白河	536.05	892.00	29/59/8	288.21
丹江口以下干流	775.30	911.63	12/83/3	280.03
宜昌至武汉左岸	543.51	1057.67	14/80/3	438.51

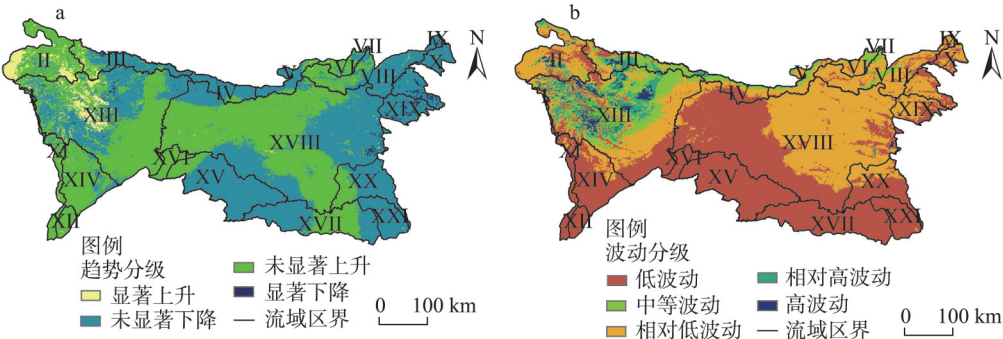


图4 2000—2018年秦岭地区产水服务变化趋势及波动程度

Fig. 4 Spatial trend and stability of water yield in Qinling Mountains from 2000 to 2018

从变化趋势的空间分布来看（图4a），秦岭中西部海拔较高地区形成少量的显著增长区，秦岭东部形成零星的显著下降区，中部大部分区域表现为不显著的上升和下降趋势。产水量呈显著上升趋势的区域主要分布于大夏河与洮河流域的西侧和东南侧、渭河宝鸡峡以上西南侧和广元昭化以上流域的中部。产水量呈显著下降趋势的区域零星分布

于丹江口以上流域的西部地、唐白河和王蚌区间北岸流域。产水量未显著上升的区域主要分布于丹江口以上、门至三门峡干流区间、青衣江和岷江干流、沱江和涪江等流域。产水量未显著下降的区域主要分布于丹江口以下干流、宜昌至武汉左岸、小浪底至花园口干流区间、王蚌区间北岸、唐白河、渠江等流域。整体来看，产水服务在秦岭中西部地区多呈上升趋势，在秦岭东侧则表现为下降趋势。

采用自然间断法将研究区波动状况划分为五类：低波动（0.16~0.80）、相对低波动（0.80~1.41）、中等波动（1.41~2.28）、相对高波动（2.28~3.47）、高波动（3.47~4.36）。

从波动性的空间分布来看（图4b），秦岭地区产水服务波动性有明显空间分异，总体上处于“北部高于南部，中低波动为主，西北波动强烈”的态势。波动程度较高的区域主要位于渭河宝鸡峡以上、广元昭化以上和三门峡至小浪底区间等流域。波动程度中等的区域多集中分布于秦岭北部边缘地区，如渭河至潼关、渭河宝鸡峡至咸阳等流域。沱江、广元昭化以上、涪江、渠江、广元昭化以下干流和宜宾至宜昌干流等流域产水比较稳定，波动性相对较弱。

根据图5可知，秦岭地区产水服务变化趋势以不显著的上升和下降为主（95.99%），呈显著上升的区域面积仅占3.22%，呈显著下降的区域面积仅占0.79%。秦巴山区产水服务波动程度高的区域面积占比为5.48%，中低波动变化区域面积占比为94.52%。总体来看，秦岭大部分地区波动程度和变化趋势都较弱，产水服务整体比较稳定。

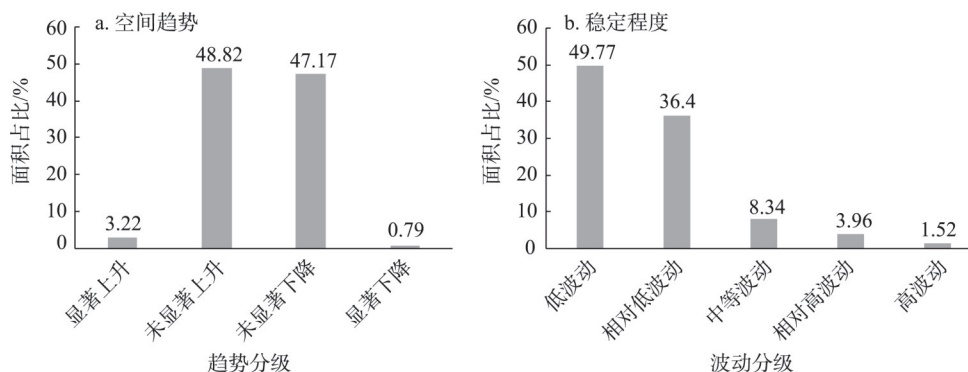


图5 秦岭地区产水服务空间趋势及稳定程度面积占比

Fig. 5 Area proportion of spatial trend and stability of water yield in Qinling Mountains

## 2.2 秦岭产水服务驱动因素探究

参考相关学者的研究成果<sup>[10-13]</sup>，基于对产水量主要相关因素以及数据可获取性的考虑，本文选取了降水量、温度、气压、风速、辐射量、实际蒸散量、归一化植被指数以及净初级生产力（NPP）这八种因素作为自变量来探究其对产水服务的驱动。

为了表征驱动因素和产水服务之间的影响关系，本文通过计算2000—2018年间产水服务和驱动因子的变化趋势，将产水服务的变化趋势作为因变量，其他驱动因子的变化趋势作为自变量进行分析，当驱动因素和产水服务的变化趋势具有相同的特征，则认为该驱动因素对产水起到正向作用，相反，则认为驱动因素对产水起到负向作用。为了保证本文所选用的驱动因子有意义，在进行GWR分析之前，先对自变量与因变量进行相关性分析，选取与因变量显著相关的自变量进行地理加权回归分析。

2.2.1 相关性分析

秦岭地区产水量变化趋势与温度、风速、气压、降水、实际蒸散量、NPP以及NDVI的变化趋势都在0.01级别的置信水平显著相关，与辐射量的变化趋势在0.05级别的置信水平显著相关（表2），因此将这八种自变量纳入驱动因素体系进一步分析它们对产水量影响的空间分异。根据相关性分析结果可知，与产水量变化趋势呈正相关的因素根据影响力由大到小为：降水量>NPP>气压>风速>NDVI，与产水量变化趋势呈负相关的因素影响由大到小为：实际蒸散量>辐射量>温度。

表2 相关性分析结果  
Table 2 Results of correlation analysis

驱动因子	温度	风速	辐射量	气压	降水	蒸散量	NPP	NDVI
相关系数	-0.073**	0.066**	-0.143*	0.097**	0.935**	-0.426**	0.196**	0.012**

注：\*表示相关性在0.01上显著；\*表示相关性在0.05上显著。

2.2.2 地理加权回归分析

由表3可知，GWR拟合结果中AICc的数值与最小二乘法（OLS）拟合结果中AICc的差值大于3，说明GWR比OLS拟合结果更优，应用性更好<sup>[4]</sup>。GWR模型校正 $R^2$ 为0.9117，较传统的全局最小二乘法（OLS）回归模型提高了0.0335个单位，表明考虑了空间非平稳性的GWR模型对秦岭地区产水量的拟合优度强于全局模型，可以更好地解释各因素对产水量作用的局部规律。

表3 OLS与GWR模型结果对比  
Table 3 Comparison of the results of OLS and GWR models

模型参数	赤池信息准则 AICc	残差估计平方差 Sigma	$R^2$	校正 $R^2$
OLS 模型	3197	0.3461	0.8784	0.8782
GWR 模型	1812	0.2952	0.9134	0.9117

由图6可知，GWR模型在不同研究区的回归系数不同，反映出不同因素在不同研究区域的作用强度存在差别。降水对研究区产水量变化正向效应显著，就回归系数来看，降水因素的系数在整个区域都为正值，回归系数的变化范围分布在0.37~1.08，影响模式呈现由北向南逐渐升高的特点，说明降水越多，产水量越高。实际蒸散量对产水量变化负向效应显著，实际蒸散量的回归系数在整个研究区都为负值，回归系数变化范围分布在-0.64~-0.29之间，在空间上对产水的影响表现为中部高于东西两侧，南部高于北侧，说明秦岭中南部地区实际蒸散量的抑制作用更为明显。植被净第一性生产力（NPP）对产水量的影响具有复杂性和差异性，回归系数分布较为分散，变化范围分布在-0.10~0.03，对产水的影响表现为在秦岭北部和西部大部分地区表现为负向效应，在秦岭的中南部分地区则表现为正向，整体来看NPP驱动系数较小，在整个区域并不突出。归一化植被指数（NDVI）对研究区产水变化产生正负两面效应，呈多中心非均衡的分布特征。回归系数的变化范围分布在-0.11~0.06，秦岭大范围区域NDVI对产水量都表现为微弱的驱动作用，仅在秦岭东北部和中南部分地区表现为抑制作用。温度对研究区产水变化主要为正向效应，但在大部分地区表现为轻微的促进作用，回归系数的变化范围分布



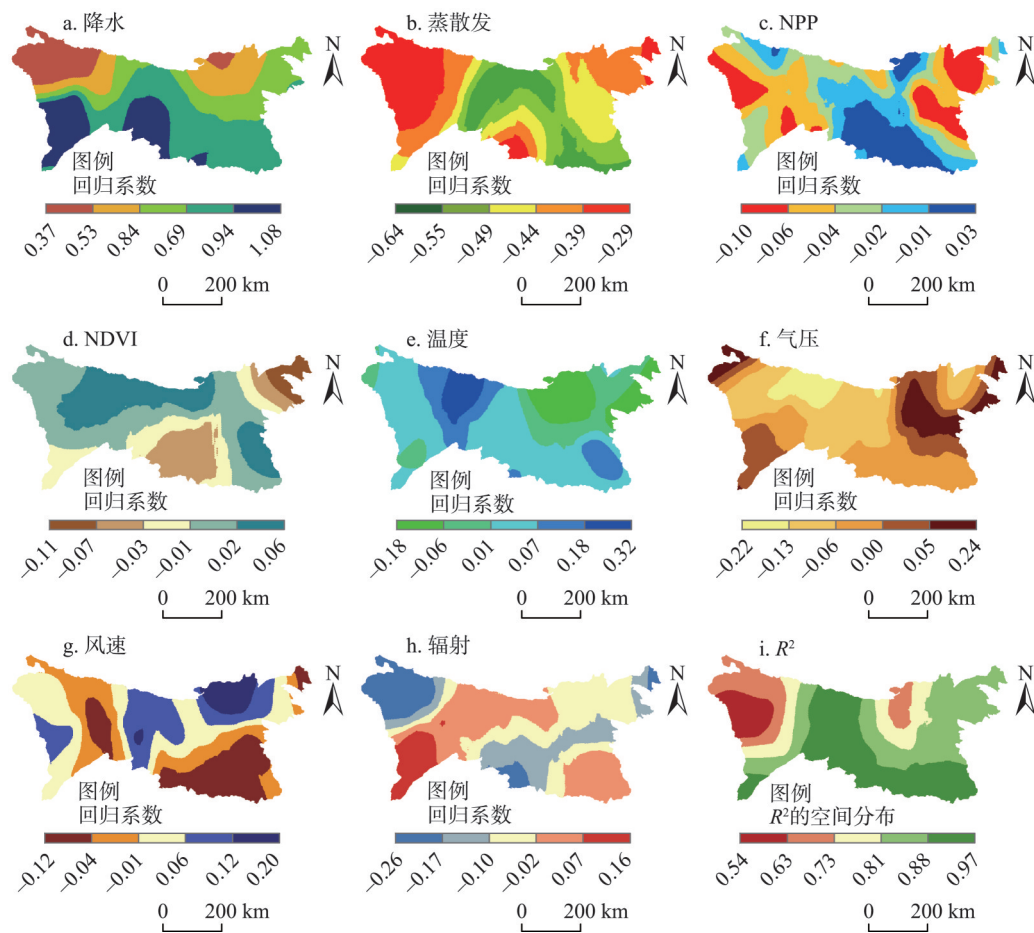


图6 产水服务影响因素回归系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of regression coefficients of influencing factors of water yield

在-0.18~0.32。在秦岭地区中北部偏西和东北部地区，有明显的产水促进和抑制中心。气压对产水量变化主要为负向效应，但强度微弱，回归系数分布在-0.22~0.24，在研究区秦岭东北地区 and 西北部分地区表现为较强的促进作用，其他地区表现为轻微的抑制作用。风速和辐射对于产水的影响都表现为驱动系数正负都有，回归系数范围分别为-0.12~0.2和-0.26~0.16，在研究区对产水的影响无明显的空间分布规律，多呈不规则聚集中心，且影响微弱。

由表4可知，秦岭地区产水量受降水主导的范围最大，总面积约为110345 km<sup>2</sup>，面积占比为38.55%。受降水主导的区域主要集中分布于秦岭地区南侧（图7），说明在产水量较大的区域主要受降水主导。其次为NPP（18.34%）和实际蒸散量（16.71%），实际

表4 主导驱动因素面积占比

Table 4 Area proportion statistics of driving factors

主导因素	降水	蒸散量	NDVI	NPP	气压	辐射量	温度	风速
面积/km <sup>2</sup>	110345	48194	7307	52508	8046	31401	13111	15345
面积占比/%	38.55	16.84	2.55	18.34	2.81	10.97	4.58	5.36

蒸散量主导区主要分布于秦岭中北部地区，NPP 主导区分布于研究区东北地区和西北地区，说明产水量中等的区域，NPP 和实际蒸散量是影响产水的主要因素。辐射量、NDVI、气压、温度和风速在研究区所主导的范围较小，主要集中在秦岭东北和西北地区，这些区域产水量相对较少，说明产水量小的区域容易受多种因素的影响。

研究结果体现出了产水量驱动力的多样性和空间差异性。研究区各流域所受主导驱动因子不同（表5），其中受单一主导因素影响

影响的流域主要有沱江、小浪底至花园口干流区间和三门峡至小浪底区间三个流域。其他流域的产水量变化受多种主导驱动因素的影响。受降水主导的流域包括：青衣江和岷江干流、沱江、广元昭化以上、涪江和渠江流域。受实际蒸散量主导的子流域包括：渭河宝鸡峡至咸阳、渭河咸阳至潼关、丹江口以上。受NDVI主导的子流域有：小浪底至花园口干流区间、王蚌区间

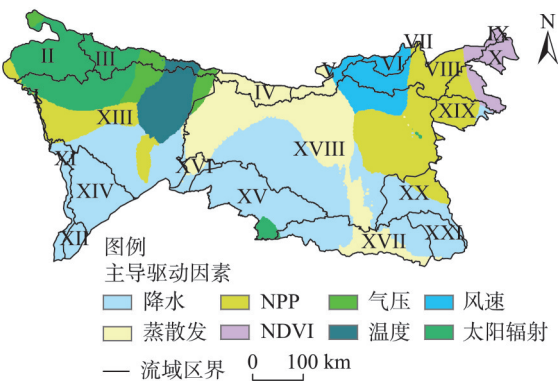


图7 秦岭地区产水服务主导驱动因素空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of dominant driving factors of water yield in Qinling Mountains

表5 秦岭各流域驱动因素面积占比

Table 5 Area proportion of driving factors of each basin in Qinling Mountains								(%)
流域	降水	蒸散量	NDVI	NPP	气压	辐射量	温度	风速
河源至玛曲	2.75	0	0	79.16	0.00	18.09	0	0
大夏河与洮河	0	0	0	5.90	5.54	88.56	0	0
渭河宝鸡峡以上	0	0.22	0	0	23.61	61.81	14.36	0
渭河宝鸡峡至咸阳	0	99.56	0	0	0.44	0	0	0
渭河咸阳至潼关	0	62.16	0	0	0	0	0	37.84
龙门至三门峡干流区间	0	0	0	5.59	0	0	0	94.41
三门峡至小浪底区间	0	0	0	100.00	0	0	0	0
伊洛河	0	0	10.28	53.03	0	0	0	36.69
小浪底至花园口干流区间	0	0	100.00	0	0	0	0	0
王蚌区间北岸	0	0	69.68	30.18	0	0.14	0	0
青衣江和岷江干流	97.23	0	0	2.77	0	0.	0	0
沱江	100.00	0	0	0	0	0	0	0
广元昭化以上	29.08	0.79	0	20.86	8.33	20.79	20.16	0
涪江	100.00	0	0	0	0	0	0	0
渠江	92.09	0	0	0	0	7.91	0	0
广元昭化以下干流	53.83	46.17	0	0	0	0	0	0
宜宾至宜昌干流	65.90	33.59	0	0	0	0.51	0	0
丹江口以上	33.63	36.76	0	22.50	0.42	0.10	0.05	6.53
唐白河	8.44	0	2.93	88.63	0	0	0	0
丹江口以下干流	70.31	0	0	29.69	0	0	0	0
宜昌至武汉左岸	98.37	1.63	0	0	0	0	0	0

北岸。受NPP主导的子流域包括: 河源至玛曲、三门峡至小浪底区间、伊洛河、唐白河。受辐射量主导的子流域包括: 大夏河与洮河、渭河宝鸡峡以上。受风速主导的子流域为: 龙门至三门峡干流区间。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 秦岭地区多年平均产水量为235.16 mm, 多年平均产水总量为 $6.73 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。秦岭地区2000—2018年产水服务出现轻微下降趋势, 2003年产水量最高(470.17 mm), 2007年产水量最低(75.57 mm)。产水量在空间上的分布呈现由南向北递减的趋势, 其中沱江流域平均产水量最高(632.97 mm), 渭河宝鸡峡附近的流域平均产水最低(57.06 mm)。

(2) 秦岭地区产水量变化趋势以不显著的上升和下降为主(95.99%), 秦岭中西部海拔高度较高地区形成了少量产水量显著增长区, 东部存在零星的产水量显著下降区。秦岭地区产水量波动性有明显空间差异, 总体上处于“北部高于南部, 中低波动为主, 西北波动强烈”的态势。整体来看, 秦岭地区产水量变化趋势和波动都较弱, 产水比较稳定。

(3) 各因素对产水服务的影响具有明显的空间异质性。降水表现为显著的正向效应, 研究区受降水主导的范围最大(33.18%), 且集中分布于产水量较多的秦岭南侧。其次为NPP(17.90%)和实际蒸散量(16.71%), 前者表现出正负两面效应, 在秦岭东北和西北部地区是主要驱动力, 后者表现为显著的负向效应, 在秦岭中北地区是主要影响因素。温度、气压、辐射等因素对产水影响较小, 仅在秦岭北侧产水较少的区域作为主导驱动因素。

#### 3.2 讨论

生态系统服务空间异质性及其影响因子的识别是生态系统服务研究的重要内容, 同时也是区域资源环境承载力评价的科学依据<sup>[1-4]</sup>, 研究秦岭产水服务变化和驱动机制对区域及全国水资源安全提供重要保障、制定生态安全保护措施具有科学指导作用。

产水量在不同年份间的波动可能与大范围的气候变化有密切联系。秦岭产水量年际变化出现峰值和低谷, 这几个年份全国气候相较于往年也存在异常<sup>[27]</sup>。秦岭产水南高北低的空间分布特征, 是由于秦岭南北麓带来的气候和植被差异导致的<sup>[13]</sup>。随着海拔的升高, 产水呈上升的趋势, 谢余初等<sup>[28]</sup>在白龙江流域研究也得到相应结果。不同土地利用类型的土壤含水量、蒸散发能力、凋落物持水能力及冠层截留量均存在差异, 所以不同土地利用类型产水能力不同<sup>[29]</sup>。研究区草地和耕地面积占比大的流域, 产水量也通常较高。说明耕地和草地对于水分的截留有较好的效果<sup>[13,30]</sup>。秦岭产水量显著下降的地区主要集中分布在秦岭地区东侧, 海拔高度较低, 水系发达的地区。气候条件是控制秦岭地区产水服务空间波动性的主要因素, 秦岭南侧气候条件湿润, 水分条件足, 产水量基数较高, 对于产水量的变化反应并不强烈, 导致波动性较低; 秦岭北侧气候相对干燥, 水分条件受限, 产水量基数低, 对于产水量的变化较为敏感, 导致波动性较高。

研究表明, 降水量、气压、温度、风速、湖泊、净初级生产力以及辐射量均对研究

区产水量变化有所影响,且各驱动因素对产水量变化的影响具有明显的空间差异。其中降水量和实际蒸散量是影响秦岭屏障区产水量变化的决定性因素,此结论与前人研究相符<sup>[30,31]</sup>,降水在产水较多的秦岭南部起主要的驱动作用,但是在产水中等的中北部地区,实际蒸散量是影响产水量的主要因素。NPP可以表征区域生态系统的质量状况和生产能力<sup>[32]</sup>,本文研究发现,NPP和产水服务之间的关系与该区域原有的生态系统质量状况相关,在秦岭南部生态系统质量状况好的地区NPP对产水服务表现为正向效应,在秦岭西北和东北部的生态系统质量较差的区域则表现为负向效应。尹礼唱等<sup>[33]</sup>在国家屏障区的研究中发现,产水服务和NPP在生态系统质量状况较差的区域表现为负相关性,如黄土高原地区;而原有生态系统质量相对较好,生产能力较高的地区,如东北森林带和南方丘陵山地,两者通常表现为正相关性。陈心盟等<sup>[34]</sup>在青藏高原地区的研究中也发现,建筑用地和未利用地等生态系统质量差的区域的两者负相关性较强,在林地和草地生态系统质量较好的区域,两者中表现为正相关性。整体而言,NPP对产水服务的正负两面效应区域的生态系统质量有关。本文仅从两者变化趋势的相关性来探讨NPP对产水的正负两面效应,对于NPP和产水之间复杂关系仍有待进一步研究。气压、辐射、温度和风速等因子总体而言对产水服务影响有限,仅在秦岭北部产水较少的地区表现为明显的驱动或抑制作用。

生态系统服务是多种因子共同作用的结果,本文重点分析自然因子对产水服务的影响,对于社会因子的影响考虑性不足。同时,在产水服务评估过程具有一定的不确定性,气象数据的空间分布会受到气象站点选择、插值方法等因素的影响,在具有垂直效应的山地地区,插值方法的选取将会增大这种不确定性,后续研究可通过增加数据量及选取多种插值方法对比,使研究结果更加精确。土地利用结构对产水服务的空间差异的影响是研究的难点,本文仅通过对不同流域下垫面的统计,来揭示流域产水的差异性,数据本身精度不高,且研究结果未能表现土地对产水的直接影响。多尺度空间分异性归因研究是当前地理学研究重点<sup>[35]</sup>,本文侧重于在流域尺度对于产水的驱动因素进行了探讨。今后的研究中,可以通过不同尺度开展产水空间分异归因的研究,以期更好地揭示产水空间分异的影响因素。

## 参考文献(References):

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington D.C.: Island Press, 2005.
- [3] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. *生态学报*, 2001, 21(11): 1885-1892. [FU B J, LIU S L, MA K M. The contents and methods of integrated ecosystem assessment (IEA). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1885-1892.]
- [4] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析. *地理学报*, 2020, 75(3): 607-619. [DAI E F, WANG Y H. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 607-619.]
- [5] PENG J, WANG A, LUO L W, et al. Spatial identification of conservation priority areas for urban ecological land: An approach based on water ecosystem services. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(6): 683-694.
- [6] MILLY P C, DUNNE K A, VECCHIA A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing



- climate. *Nature*, 2005, 438(7066): 347-350.
- [7] 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.]
- [8] FAN M, SHIBATA H. Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River Watershed, Northern Japan. *Ecological Indicators*, 2015, 50(21): 79-89.
- [9] RONALD C, FRANCISCO E, DANIEL M L, et al. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in pinus elliotii forests in Southeastern USA. *Forests*, 2014, 5(6): 1409-1431.
- [10] 吴健, 李英花, 黄利亚, 等. 东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3216-3223. [WU J, LI Y H, HUANG L Y, et al. Spatiotemporal variation of water yield and its driving factors in Northeast China. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(11): 3216-3223.]
- [11] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽姝, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 669-679. [SUN X Y, GUO H W, LIAN L S, et al. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 669-679.]
- [12] 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.]
- [13] 宁亚洲, 张福平, 冯起, 等. 秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素. *生态学杂志*, 2020, 39(9): 3080-3091. [NING Y Z, ZHANG F P, FENG Q, et al. Temporal and spatial variation of water conservation function in Qinling Mountain and its influencing factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(9): 3080-3091.]
- [14] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM S, CHARLTON M. Geographically weighted regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D*, 1998, 47(3): 431-443.
- [15] HUANG Y, LEUNG Y. Analysing regional industrialisation in Jiangsu province using geographically weighted regression. *Journal of Geographical Systems*, 2002, 4(2): 233-249.
- [16] 侯文娟, 高江波, 戴尔阜, 等. 基于 SWAT 模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异. *地理学报*, 2018, 73(7): 1268-1282. [HOU W J, GAO J B, DAI E F, et al. The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe Basin as the south source of Wujiang. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1268-1282.]
- [17] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析. *自然资源学报*, 2020, 35(7): 1714-1727. [GENG T W, CHEN H, ZHANG X, et al. Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi province based on GWR. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7): 1714-1727.]
- [18] HIJMANS R J, CAMERON S E, PARRA J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(2): 1965-1978.
- [19] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.
- [20] ZHANG L, DAWES W R, WALKER G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [21] LYU N, SUN G, FENG X M, et al. Water yield responses to climate change and variability across the north-south transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 96-105.
- [22] ZHANG Y, LUO P P, ZHAO S F, et al. Control and remediation methods for eutrophic lakes in the past 30 years. *Water Science and Technology*, 2020, 81(6): 1099-1113.
- [23] DENG S F, YANF T B, ZENG B, et al. Vegetation cover variation in the Qilian Mountains and its response to climate change in 2000-2011. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(6): 1050-1062.
- [24] 邓兴耀, 姚俊强, 刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化. *干旱区研究*, 2017, 34(1): 10-19. [DENG X Y, YAO J Q, LIU Z H. Spatiotemporal change of vegetation coverage in arid regions in Central Asia based on GIMMS NDVI. *Arid Zone Research*, 2017, 34(1): 10-19.]

- [25] 马勇, 黄智洵. 长江中游城市群绿色发展指数测度及时空演变探析: 基于GWR模型. 生态环境学报, 2017, 26(5): 794-807. [MA Y, HUANG Z X. Study on spatial-temporal evolution and measurement of green development index of urban agglomerations in the middle reaches of Yangtze River: GWR model based. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(5): 794-807.]
- [26] DU H B, MULLEY C. Relationship between transport accessibility and land value: Local model approach with geographically weighted regression. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1977(1): 197-205.
- [27] 曹晴, 郝振纯, 傅晓洁, 等. 1960—2017年中国极端气候要素时空变化分析. 人民黄河, 2020, 42(2): 11-17. [CAO Q, HAO Z C, FU X J, et al. Analysis of spatial-temporal changes of extreme climatic elements in China from 1960 to 2017. Yellow River, 2020, 42(2): 11-17.]
- [28] 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. Spatio-temporal variation of water supply service in Bailong River Watershed based on InVEST model. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1337-1347.]
- [29] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739. [YANG J, XIE B P, ZHANG D G. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2731-2739.]
- [30] 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 基于InVEST模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析. 草业科学, 2020, 37(7): 1313-1324. [LI Y Y, FAN J H, LIAO Y. Analysis of spatial and temporal differences in water conservation function in Zhangjiakou based on the InVEST model. Pratacultural Science, 2020, 37(7): 1313-1324.]
- [31] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1728-1743. [LIU D Q, CAO E J, ZHANG J X, et al. Spatiotemporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang Watershed of Gansu. Journal of Natural Resources, 2020, 35(7): 1728-1743.]
- [32] IMHOFF M L, BOUNOUA L, DEFRIES R, et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(4): 434-443.
- [33] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172. [YIN L C, WANG X F, ZHANG K, et al. Trade-offs and synergy between ecosystem services in National Barrier Zone. Geographical Research, 2019, 38(9): 2162-2172.]
- [34] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 等. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. 地理研究, 2021, 40(1): 18-34. [CHEN X M, WANG X F, FENG X M, et al. Ecosystem service trade-off and synergy on Qinghai-Tibet Plateau. Geographical Research, 2021, 40(1): 18-34.]
- [35] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920. [HUANG M Y, YUE W Z, FANG B, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain Area, Central China from 1970 to 2015. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1904-1920.]

## Spatio-temporal variation of water yield and its driving factors in Qinling Mountains barrier region

WANG Xiao-feng<sup>1,2</sup>, FU Xin-xin<sup>3</sup>, CHU Bing-yang<sup>3</sup>, LI Yue-hao<sup>3</sup>, YAN Yu<sup>3</sup>, FENG Xiao-ming<sup>4</sup>

(1. College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710064, China; 3. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The Qinling Mountains region, an important water conservation region and ecological function support region, as well as a major ecological barrier in China, plays a critical role in conserving water resources. Based on the data of meteorology and land use, this paper estimates the water yield service in the Qinling region based on InVEST model, and uses spatio-temporal analysis method and geographically weighted regression (GWR) to discuss the variation characteristics and driving factors of water-producing services in the study region from 2000 to 2018. The results show that the average annual water yield in Qinling is 235.16 mm, showing a weak downward trend in 2019 with the highest value (470.17 mm) in 2003 and the lowest (75.57 mm) in 2007. The spatial distribution of water yield gradually decreased from the south to the north with obvious "stepped" distribution characteristics. The change trend of water yield has an insignificant increase and decrease (95.99%), and a small number of regions with a significant increase are formed at higher altitude in the Central and Western Qinling region. There are obvious spatial differences in the fluctuation of water yield in the region, which present a trend of "higher in the north than in the south, mainly with medium and low fluctuation and strong fluctuation in the northwest". The influence of various factors on water production services has obvious spatial heterogeneity. The study region is dominated by precipitation (33.18%), which is concentrated in the southern part of Qinling Mountains with more water production, followed by NPP (17.90%) and actual evapotranspiration (16.71%), which are the main influencing factors in the Central and Northern Qinling Mountains. The research results provide theoretical and technical support for the safety and sustainable utilization of water resources in the Qinling region.

**Keywords:** ecosystem services; water yield; spatio-temporal heterogeneity; driving factors; Qinling Mountains barrier region