

秦岭水源涵养功能解析

王辉源¹, 宋进喜^{1,2,3}, 孟清¹

(1.西北大学城市与环境学院,陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127;2.西北大学秦岭研究院,西安 710127;3.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要: 稳定且良好的水源涵养功能是区域发展的基础,生态系统的水源涵养功能是当下区域生态水文研究的关键领域。秦岭因其重要的生态功能与地理环境特征,掌握其水源涵养功能的变化、水源涵养功能空间格局、影响因素敏感性等信息具有科学和实践指导双重意义。选取陕西秦岭为研究区,基于 InVEST 产水模块和水源涵养模型,计算秦岭 2000—2014 年 15 年间水源涵养量的变化,从坡度、高程、坡向方面分析了水源涵养空间格局,选取降水、蒸散发、季节常数、根系深度、叶面积指数等因素敏感性。结果表明:(1)年均水源涵养量与年均降雨量基本同步波动,2000—2014 年 15 年间秦岭水源涵养总量呈增加趋势,年均增加值为 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$,并且增加的趋势越来越明显。秦岭主要流域年平均水源涵养量为汉江流域>丹江流域>渭河流域>洛河流域>嘉陵江流域。(2)秦岭水源涵养功能与高程、坡度、植被覆盖度呈正相关,阴坡水源涵养量大于阳坡,子流域水源涵养功能以中等重要和重要为主,一般重要和极重要较少。(3)影响水源涵养功能关键因子参数敏感性为降雨>潜在蒸散发>叶面积指数>季节常数>植被根系深度。

关键词: 秦岭; InVEST 模型; 水源涵养功能; 空间格局

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0211-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.030

Analysis of Water Conservation of Qinling Mountains

WANG Huiyuan¹, SONG Jinxi^{1,2,3}, MENG Qing¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127; 2. Institute of Qinling Mountains, Northwest University, Xi'an 710127; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Stable and good water conservation functions are the foundation of regional development. The water conservation functions of ecosystems are the key areas of current regional ecohydrological research. Because of Qinling's important ecological function and geographical environment characteristics, it has the dual meaning of scientific and practical guidance to grasp the information as the changes of its water conservation function, the spatial pattern of water conservation function and the sensitivity of influencing factors. In this paper, Qinling in Shaanxi was selected as the research area. Based on the In VEST water production module and water conservation model, the changes of water conservation in Qinling from 2000 to 2014 were calculated. The spatial pattern of water conservation was analyzed from the aspects of slope and elevation, and the sensitivity of factors such as precipitation, evapotranspiration, seasonal constants, root depth, and leaf area index were selected. The results showed that: (1) The annual average water conservation and annual average rainfall basically fluctuated synchronously, and the total water conservation in the Qinling Mountains increased from 2000 to 2014 with the average annual increase of $2 \times 10^9 \text{ m}^3$, and the increasing trend was becoming more and more obvious. The average annual water conservation in the main watersheds of Qinling Mountains was Hanjiang River Basin>Danjiang River Basin>Weihe River Basin>Luohe River Basin>Jialing River Basin. (2) The water conservation function of Qinling was positively correlated with elevation, slope, and vegetation coverage. The water conservation capacity of the shady slope was greater than that of the sunny slope. The water conservation function of the sub-basin was mainly of

收稿日期: 2020-05-28

资助项目: 陕西省重点研发计划项目“秦岭水源涵养演变机制及其调控技术与示范”(2019ZDLSF05-02)

第一作者: 王辉源(1988—), 男, 陕西榆林人, 博士研究生, 主要从事森林水文学研究。E-mail: hy69@stumail.nwu.edu.cn

通信作者: 宋进喜(1971—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文研究。E-mail: jinxisong@nwu.edu.cn

水量 $Y(x)$, 公式为:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (1)$$

式中: $Y(x)$ 表示栅格单元 x 年产量 (mm); $\text{AET}(x)$ 表示栅格单元 x 年实际蒸散发量 (mm); $P(x)$ 代表栅格单元 x 年降雨量 (mm)。

$\frac{\text{AET}(x)}{P(x)}$ 的计算, 采用 Baw-Puh^[32] 和 Zhang 等^[33] 提出的 Budyko 水热耦合平衡假设:

$$\frac{\text{AET}(x)}{P(x)} = 1 + \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} - \left\{1 + \left(\frac{\text{PET}(x)}{P(x)}\right)^\omega\right\}^{\frac{1}{\omega}} \quad (2)$$

式中: $\text{PET}(x)$ 表示栅格单元 x 年潜在蒸散量 (mm); ω 表示自然气候—土壤性质的非物理参数, 无量纲。

潜在蒸散量 $\text{PET}(x)$ 的计算:

$$\text{PET}(x) = K_c(Lx) \cdot \text{ET}_0(x) \quad (3)$$

式中: $K_c(Lx)$ 无量纲, 由 LAI 计算获得。

ET_0 表示栅格单元 x 的参考作物蒸散:

$$\text{ET}_0 = 0.0013 \times 0.408 \times RA \times (T_{\text{avg}} + 17) \times (TD - 0.0123P)^{0.76} \quad (4)$$

式中: RA 为太阳大气顶层辐射 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); T_{avg} 为日最高温均值与日最低温均值的平均值 ($^{\circ}\text{C}$); TD 为日最高温均值与日最低温均值的差值 ($^{\circ}\text{C}$)。

RA 太阳大气顶层辐射:

$$RA = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_x \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_x)] \quad (5)$$

式中: G_{sc} 为太阳常数, $G_{sc} = 0.0820 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$; d_r 为日地相对距离的倒数; ω_x 为太阳日落时角; φ 为测站纬度; δ 为赤纬角。

$\omega(x)$ 为经验常数:

$$\omega_x = Z \frac{\text{AWC}_x}{P_x} \quad (6)$$

式中: Z 为 zhang 系数, 又称季节常数, 能够代表区域降水分布及其他水文地质特征, 定义为 1 到 30 排序浮动值, 根据计算研究区季节常数为 1.17, AWC_x 表示植被有效可利用水:

$$\text{AWC}_x = \min(\max\text{SoilDepth}_x, \text{RootDepth}_x) \times \text{PAWC}_x \quad (7)$$

式中: $\max\text{SoilDepth}_x$ 为最大的土壤的根系埋藏深度 (mm), 取整数; RootDepth_x 为植被覆盖地类的最大根系深度 (mm), 取整数。 PAWC_x 为植物利用水分含量, 即田间持水量与萎蔫点之间的差值:

$$\text{PAWC}_x = 54.509 - 0.132\text{sand} - 0.003(\text{sand})^2 - 0.055\text{silt} - 0.006(\text{silt})^2 - 0.738\text{clay} + 0.007(\text{clay})^2 - 2.688\text{OM} + 0.501$$

$$(\text{OM})^2 \quad (8)$$

式中: sand 为土壤砂粒含量 (%); silt 为土壤粉粒含量 (%); clay 为土壤黏粒含量 (%); OM 为土壤有机质含量 (%)。

本文中水源涵养模型是基于 InVEST 模型 Water Yield 计算结果图层与地形指数、土壤饱和导水率、流速系数等参数计算产水量在栅格单元上停留时间, 表示在地形、土壤、气候等因素综合作用下, 水分保持在系统内的能力。

$$\text{Retention} = \min\left(1, \frac{249}{\text{Velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times \text{TI}}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{\text{Ksat}}{300}\right) \times \text{Yield} \quad (9)$$

式中: Retention 表示水源涵养量 (mm); Velocity 表示流速系数, 采用模型参数表数据; Ksat 表示土壤饱和导水率 (cm/d), 利用 SPAW 土壤计算软件得出; TI 表示地形指数, 计算公式为:

$$\text{TI} = \lg\left(\frac{\text{Drainage-Area}}{\text{Soil-Depth} \times \text{Percent-Slope}}\right) \quad (10)$$

式中: Drainage-Area 为集水区栅格数量, 由 ArcGIS 根据 DEM 提取流域边界计算得出, 无量纲; Soil-Depth 为土层深度, 由陕西土壤计算获得^[34] (mm); Percent-Slope 为坡度百分比, 由 ArcGIS 根据 DEM 生成坡度, 由坡度在栅格计算器中生产坡度百分比, 无量纲。

1.3 数据来源与参数处理

文中数据来源见表 1。对表 1 获取到的数据在 ArcGIS 10.4 平台进行预处理和计算, 获取模型需要输入的空间参数^[35-36]。

模型所需数据输入之前, 需定义栅格数据投影, 空间分辨率和数据格式, 文中栅格数据投影统一为 Krasovsky_1940_Albers, 空间分辨率 1 km, 数据格式 GRID, 时间分辨率 2000—2014 年共 15 年。

2 结果与分析

2.1 水源涵养功能格局分析

2.1.1 水源涵养功能格局分析 情景 1 根据国家林业局 2003 年 4 月颁布《森林资源规划设计调查主要技术规定》^[37], 把研究区的坡度分为 6 级, 在 ArcGIS 平台提取不同坡度分级空间范围与水源涵养层叠加分析, 计算不同坡度分级的年平均水源涵养量, 判断不同坡度分级情景下年均水源涵养量的变化; 情景 2 根据 DEM 提取出的秦岭坡度图, 计算不同坡度对应的年均水源涵养量, 判断水源涵养量与坡度之间的关系。按坡度分级水源涵养功能险坡水源涵养量最大, 主要分布在秦岭南北分界线两侧, 河流上游、流域分水岭两侧、秦岭北麓陡坡短, 以险坡居多, 水源涵养量较大。险坡相比其他坡

度植被茂密,降雨量丰沛,但潜在蒸散发量较少,2000 年全流域平均降水量 809.8 mm,险坡平均降水量 822.4 mm,2000 年全流域平均潜在蒸散发量 1 388 mm,险坡平均潜在蒸散发量 1 382 mm,险坡主要以郁闭度 $>30\%$ 的天然林和人工林和郁闭度 $>20\%$ 天然草地与改良草地为主,具有良好的水源涵养功能,

平坡水源涵养量最低,主要分布在秦岭南麓河谷地带、河流下游、河流干流两侧,河流的水源涵养功能较差。缓坡、斜坡、陡坡、急坡水源涵养量变化幅度较小,具有一般水源涵养功能。按连续坡度与水源涵养关系,两者呈正相关,斜率为 0.41,随着坡度的升高年平均水源涵养量呈微弱增加(图 2)。

表 1 模型数据需求来源及参数本地化

模块	需要数据	数据来源及计算处理
Yield	Precipitation	降雨气象数据来源于国家气象数据网和陕西省气象局,气象站点 42 个,分布均匀,采用克吕格差值
	PET	潜在蒸散量数据采用 MOD16 数据,空间分辨率 1 km,数据来源于 NTSG(Numerical Terradynamic Simulation Group)
	Root depth	根据陕西植被和其他参考文献 ^[35-36]
	PAWC	利用 SPAW 土壤计算软件获得
	Land use	中国科学院资源环境科学数据中心,土地利用现状遥感数据集
	Sub_Watersheds	在 ArcGIS 平台下利用 DEM 生成河网数据,提取子流域
	Watersheds	在 Sub_Watersheds 数据基础上合并生成流域边界
	biophysical	生物物理参数表,由 Lucode、LULC_desc、LULC_veg、root_depth、Kc 组成,其中 LULC_veg 中植被覆盖地类赋值为 1,其他赋值为 0;root_depth 参考文献获得;Kc 用叶面积指数替代
	K _c	由植被叶面积指数 LAI 计算获得,LAI 来源于 Nasa 网站
	Z 季节常数	根据降雨量、潜在蒸散量等数据计算,值为 1.17
Retention	TI	根据汇水面积栅格数量,坡度百分比,土层深度计算获取
	Ksat	利用 SPAW 土壤计算软件得出
	Velocity	根据模型参数表获取

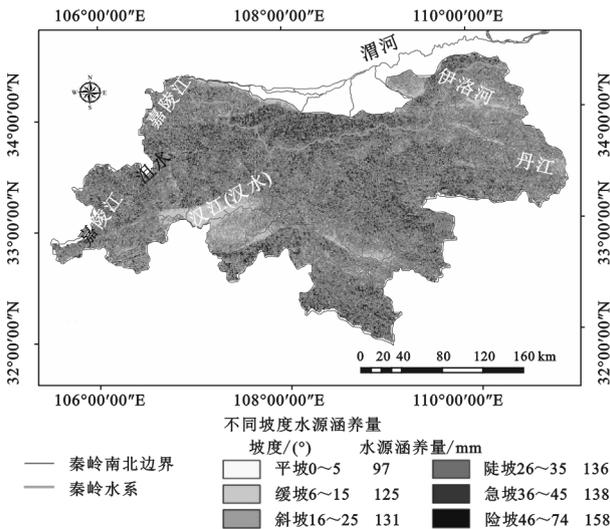
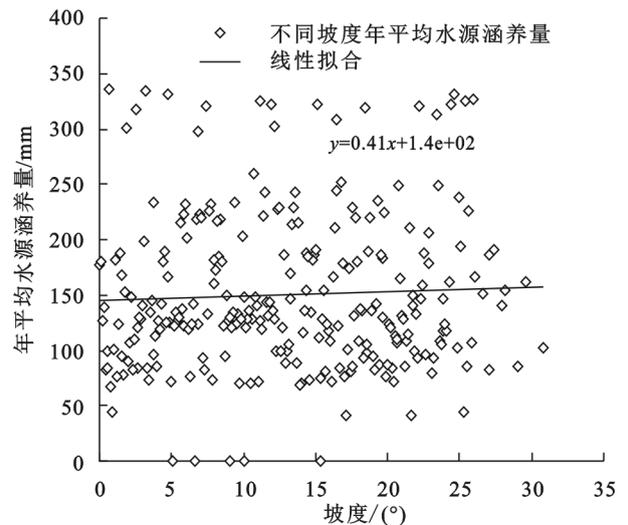


图 2 秦岭水源涵养功能与坡度关系



秦岭高程图层与年均水源涵养量图层叠置分析,获取不同高程的年均水源涵养量,对高程与年均水源涵养量散点进行三次曲线拟合,求取曲线拐点,然后分析年均水源涵养量与高程之间的关系(图 3)。年均水源涵养量随着高程的增加而增加,但呈现一定区间性,164~1 140.8 m 年均水源涵养量与高程正相关,1 140.8~2 902.2 m 年均水源涵养量与高程负相关,2 902.2 m 以后年均水源涵养量与高程正相关。水源涵养量与高程的关系和降雨量与高程的关系基本同步波动,1 231.1 m 以下年均降雨量与高程正相关,1 231.1~2 948.9 m 年均降雨量与高程负相关,2 948.9 m 以上年均降雨量与高程正相关。

阴坡 0~45°和 315°~360°,半阴坡 45°~135°,阳坡 135°~225°,半阳坡 225°~315°,平地 0。平地年均水源涵养量最低,阴坡年均水源涵养量大于阳坡,半阳坡年均水源涵养量大于半阴坡,阴坡水源涵养量最大。植被叶面积指数 LAI 代表植被覆盖度,叶面积指数越高植被的郁闭度越大,植被越茂密,对降雨的截留和水分的贮存越大,对秦岭植被叶面积指数与年均水源涵养量进行叠置分析可知,叶面积指数与年均降雨量呈正相关,随着植被郁闭度越高,水源涵养功能越强(图 4)。

2.1.2 水源涵养功能重要性分级 根据全国环保部、国家发改委联合发布《生态保护红线划定技术指南》(环办生态[2017]48 号),采用 4 分位数对秦岭子

流域年均水源涵养量进行分级,以此辨别不同子流域水源涵养重要性,由图 5 可知,2000 年秦岭子流域水源涵养功能极重要区占比面积较少,约为流域总面积的 4.9%,主要分布在秦岭以北,渭河流域的黑河子流域和泾河子流域;水源涵养重要区占比面积最大,约为流域总面积的 53.64%,主要分布在汉江南北两岸、

嘉陵江东岸、丹江上游和洛河流域;水源涵养中等重要区约为流域总面积的 39.71%,占比面积小于水源涵养重要区,主要集中分布在秦岭以南汉江上游和干流、嘉陵江上游和干流、秦岭以北渭河的灞河流域;水源涵养一般重要区占比面积较少,约为流域总面积的 1.75%,主要分布在丹江下游,西汉水下游。

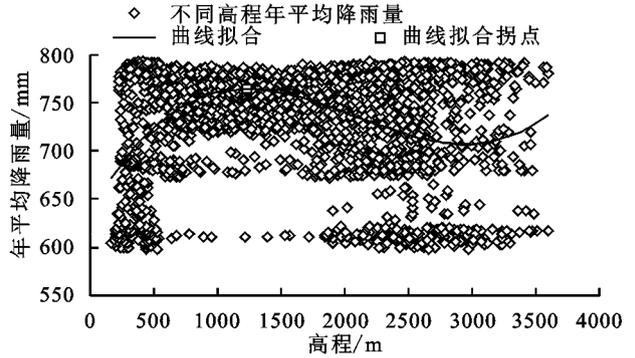
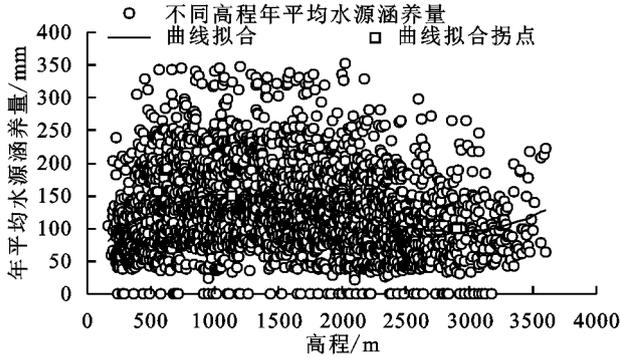


图 3 秦岭水源涵养功能与高程的关系

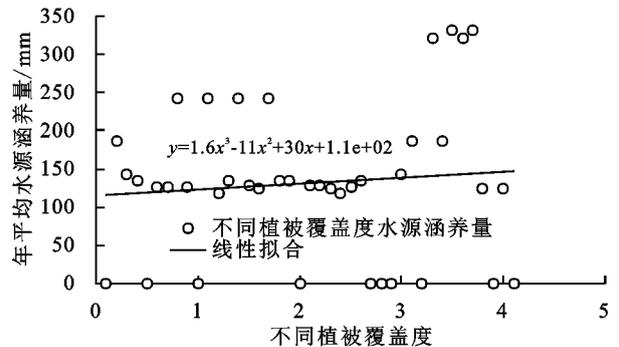
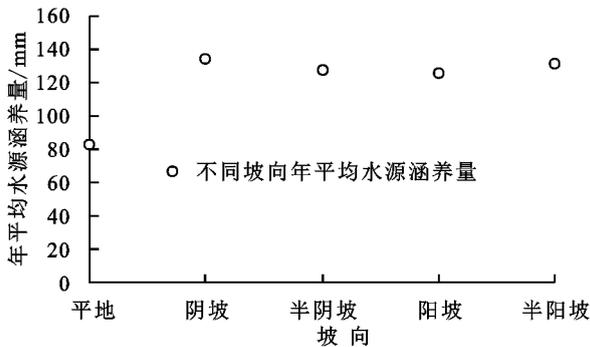


图 4 秦岭水源涵养功能与坡向、植被覆盖度关系

2.2 水源涵养量趋势分析

2.2.1 秦岭水源涵养量变化趋势分析 秦岭全流域 2000—2014 年近 15 年间,全流域水源涵养总量年际变化幅度较大,但整体呈增加趋势。其中,2011 年水源涵养总量最大,达 $2.95 \times 10^{11} \text{ m}^3$,2001 年研究区水源涵养总量最小,为 $1.28 \times 10^{11} \text{ m}^3$,变化幅度 $1.67 \times 10^{11} \text{ m}^3$,水源涵养总量的变化趋势呈双峰双谷,2001 年和 2002 年,2012 年和 2013 年为谷底,2003 年和 2011 年为峰顶。对水源涵养总量进行趋势线拟合,斜率为 2×10^9 ,每 5 年为一阶段分析水源涵养总量,第 1 个 5 年 2000—2004 年年均水源涵养总量为 $1.80 \times 10^{11} \text{ m}^3$,第 2 个 5 年 2005—2009 年年均水源涵养总量为 $1.88 \times 10^{11} \text{ m}^3$,第 3 个 5 年 2010—2014 年年均水源涵养总量为 $2.09 \times 10^{11} \text{ m}^3$,第 2 个 5 年与第 1 个 5 年差值为 $8 \times 10^9 \text{ m}^3$,第 3 个 5 年与第 2 个 5 年差值为 $2.1 \times 10^{10} \text{ m}^3$,研究区水源涵养总量增加的幅度越来越大(图 6)。秦岭全流域年均降雨量与年均水源涵养量进行比较,近 15 年年均降雨量与年均水源涵养量变化趋势一致,呈同步增加,但增加幅度不同,年均降雨量增加值为 7 mm/d ,年均水源涵养量增加值为 1.5 mm/d ,年均水源涵养增加幅度小于降雨量。

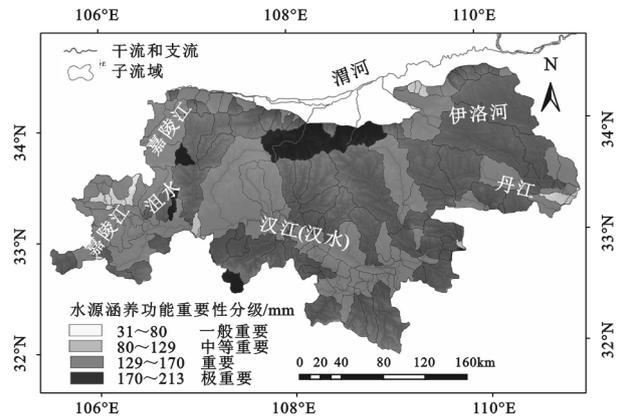


图 5 秦岭水源涵养功能重要性分级

2.2.2 秦岭子流域水源涵养量 依据 30 m 空间分辨率的 DEM 数据,进行水文分析,提取秦岭主要流域和子流域,主要流域为秦岭以北的渭河流域、秦岭以南的嘉陵江流域、汉江流域、丹江流域和洛河流域,子流域 182 个。

利用 2014 年数据计算秦岭流域和子流域水源涵养量,5 个流域产水量平均值从大到小依次为:汉江流域(137.76 mm)>丹江流域(122.60 mm)>渭河流域(122.31 mm)>洛河流域(117.51 mm)>嘉陵江流域(85.28 mm),子流域产水量平均值比较大的主要集中在

流域上游,牧马河上游(212.08 mm)、沔河上游(188.61 mm)、黑河上游(174.83 mm),子流域产水量平均值比较小

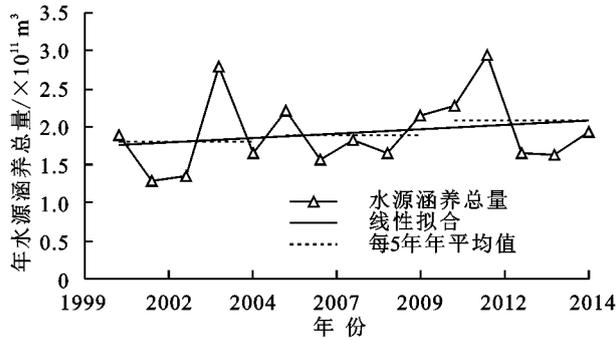


图 6 秦岭水源涵养量变化趋势

的主要集中在河流的下游和干流,西汉水下游(31.26 mm)、水河下游(67.50 mm)、丹江下游(81.77 mm)(图 7)。

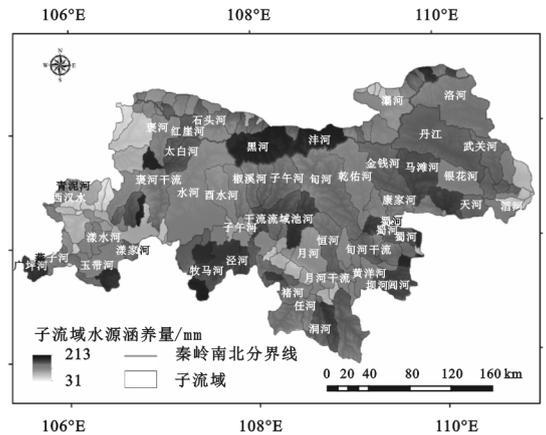
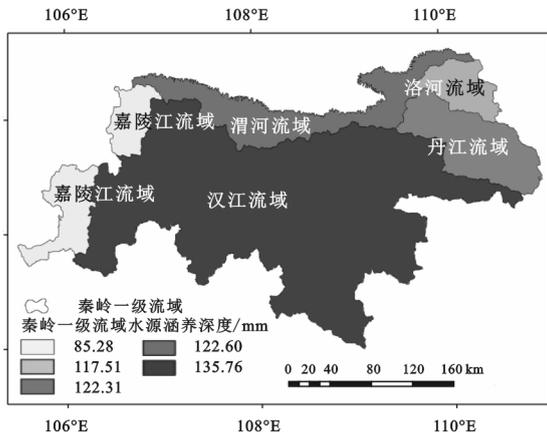
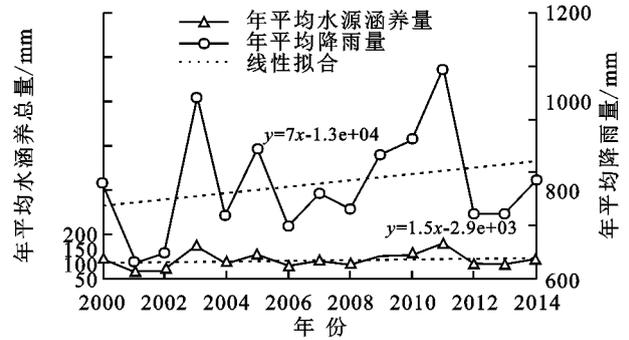


图 7 秦岭流域及子流域水源涵养量

2.3 水源涵养功能关键因子敏感性分析

模型参数敏感性分析能够了解不同参数重要性,重要参数对数据准确性、精度、时限都有极高的要求,重要参数对模型模拟结果、对未来场景模拟与预测、对相关部门的管理都具有重要影响。本文选取降水 P 、潜在蒸散发 PET 、季节常数 Z 、作物因子 k_c 、植被根系深度 $root_depth$ 5 个水源涵养功能关键因子分析其敏感性,依据 2014 年降水数据、潜在蒸散发数据、季节常数、植被覆盖度代表作物因子、植被根系深度数据为基准,以 5% 的固定步长对参数进行扰动,即保持其他参数不变的情况下,对某一个参数基准值进行 5% 的扰动,扰动范围为 $-25\% \sim 25\%$,也就是基准值的 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, 100%, 105%, 110%, 115%, 120%, 125%, 然后分别计算不同参数扰动下模型模拟结果。降水因子与水源涵养功能呈正相关,潜在蒸散发因子、作物因子、季节因子、植被根系深度因子与水源涵养功能呈负相关,降水因子斜率 208.3,蒸散发因子斜率 -46.1 ,季节因子斜率 -32.8 ,作物因子斜率 -45.9 ,植被根系深度因子斜率 -22.7 ,参数敏感性为降水因子 $>$ 蒸散发因子 $>$ 作物因子 $>$ 季节因子 $>$ 植被根系深度因子(图 8)。

3 讨论

(1)水源涵养功能动态分析比静态描述意义更

大,因为降雨、蒸发年际变化波动较大,如果选择某几个相同间隔年份进行水源涵养功能的比较,结果随机性比较大,不能很好地反映水源涵养功能动态趋势。水源涵养量年际变化与降雨量年际变化近乎同步波动,完全说明降雨量决定了一个地区水源涵养量。但往往降雨量的变化趋势大于水源涵养量的变化趋势,主要原因降雨量的季节分配对水源涵养量具有重要影响,InVEST 模型在刻画年际水源涵养量上具有较高的准确度,但无法计算月或者天时间尺度上水源涵养量的变化。

(2)水源涵养功能呈现区域异质性,一些特殊的区域往往由于人为因素或者自然因素水源涵养功能表现出一定特殊性。比如,秦岭北麓黑河流域呈现极高的水源涵养量,因为黑河水库、黑河上游自然保护区增强了黑河流域水源涵养功能,在 1 200 m 和 1 900 m 水源涵养量呈现区间性,高程是影响水源涵养功能的主要地形因子,不同高程水、热、植被不同,进而影响水源涵养格局,连续性高程、坡度、植被覆盖度对应的年均水源涵养量能更好地刻画水源涵养功能空间格局,随着高度的上升、坡度的上升、植被覆盖度的增加,水源涵养功能增强,主要原因是高度上升,坡度也越来越高,植被覆盖度也越来越高,降雨量增加,枯枝落叶层变厚,温度降低,蒸散发减弱,土壤具

有良好的结构和孔隙度,更有利于水分贮存。

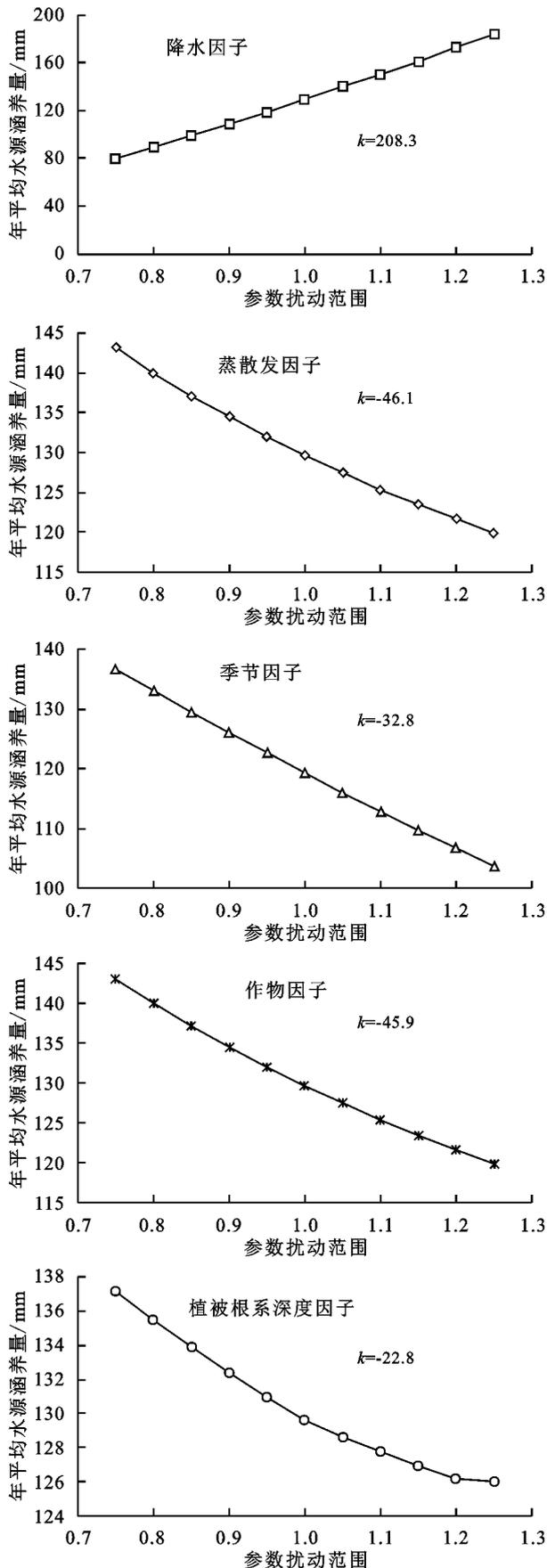


图8 关键因子参数敏感性

(3)了解关键因子的敏感性,一方面为后续开展的水源涵养功能模拟与预测研究奠定一定基础;另外一方

面对关键因子数据的来源、预处理和分析更需严谨。

4 结论与建议

4.1 主要结论

(1)秦岭水源涵养功能随着高度的升高呈增加趋势,但呈现一定区间性,164~1 140.8 m 年均水源涵养量与高程呈正相关,1 140.8~2 902.2 m 年均水源涵养量与高程呈负相关,2 902.2 m 以后年均水源涵养量与高程呈正相关。随着坡度上升水源涵养功能增强,随着植被覆盖度加大水源涵养功能增加,阴坡的水源涵养功能大于阳坡。

(2)2000—2015年秦岭水源涵养总量为 $1.28 \times 10^{11} \sim 2.95 \times 10^{11} \text{ m}^3$,均值为 $1.92 \times 10^{11} \text{ m}^3$,年均水源涵养量为 85.75~197.51 mm,均值为 135.61 mm,2001年水源涵养总量最低,2011年水源涵养总量最高,15年间秦岭水源涵养总量呈增加趋势,年均增加值为 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$,并且增加的趋势越来越明显。秦岭主要流域水源涵养量为汉江流域>丹江流域>渭河流域>洛河流域>嘉陵江流域,

(3)秦岭子流域水源涵养功能以中等重要和重要为主,一般重要和极重要较少。影响水源涵养功能关键因子参数敏感性为降水因子>蒸散发因子>作物因子>季节因子>植被根系深度因子。

4.2 建议

(1)水源涵养功能长时间序列动态变化趋势对区域决策者具有重要价值,但目前研究以静态描述居多,长时间序列关键因子的动态变化、径流量动态变化与水源涵养功能结合研究才能全面反映水源涵养功能的驱动机制及变化规律。

(2)加强水源涵养功能空间异质性的研究,利用无人机、近景摄影测量、低空遥感等技术获取特殊区域高精度、大范围、连续性的数据集,获得高分辨率水源涵养功能空间格局,结合水源涵养功能模拟与预测,结合区域实际特性,优化区域水源涵养服务功能。

参考文献:

- [1] 李文华,张彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):1-10.
- [2] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [3] 李景文.森林生态学[M].北京:中国林业出版社,1994.
- [4] Núñez D, Nahuelhual L, Oyazún C. Forests and water: The value of native temperate forests in supplying water for human consumption[J].Ecological Economics, 2006,58(3):606-616.
- [5] 吕一河,胡摇健,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[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
- [6] 王晓学,沈会涛,李叙勇,等.森林水源涵养功能的多尺度内涵,过程及计量方法[J].生态学报,2013,33(4):1019-1030.
- [7] 高成德,余新晓.水源涵养林研究综述[J].北京林业大学学报,2000,22(5):78-82.
- [8] 张彪,李文华,谢高地,等.森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J].生态学杂志,2009,28(3):529-534.
- [9] Baumgartner A, Reichel E. The world water balance; mean annual global, continental and and maritime precipitation, evaporation and run-off [J]. *Agricultural Water Management*, 1975, 1(1):100-101.
- [10] Rutter A, Kershaw K, Robins P, et al. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine[J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9:367-384.
- [11] Leyton L. Rainfall interception in forest and moorland [C]//Rainfall interception in forest and moorland. International symposium on forest hydrology. Pergamon: 163-178.
- [12] 李文宇,余新晓,马钦彦,等.密云水库水源涵养林对水质的影响[J].中国水土保持科学,2004,2(2):80-83.
- [13] 刘康,马乃喜,胥艳玲,等.秦岭山地生态环境保护与建设[J].生态学杂志,2004,23(3):157-160.
- [14] 党坤良,雷瑞德.秦岭火地塘林区不同林分水源涵养效能的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1995,1(1):79-84.
- [15] 雷瑞德.秦岭火地塘林区华山松林水源涵养功能的研究[J].西北林学院学报,1984,1(1):19-33.
- [16] 王建让.秦岭火地塘林区不同林分的枯枝落叶层的测定及其在水源涵养中的意义[J].西北林学院学报,1984,1:35-42.
- [17] 卓静,何慧娟,王娟.秦岭地区水源涵养能力评估[J].陕西气象,2015(3):12-15,16.
- [18] 李晶,任志远.秦巴山区植被涵养水源价值测评研究[J].水土保持学报,2003,17(4):132-138.
- [19] 康艳.秦岭山地植被水源涵养功能空间分布格局及生态保育策略[D].西安:西北大学,2005.
- [20] 雷军成,刘纪新,雍凡,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的五马河流域生态系统服务多情景评估[J].生态与农村环境学报,2017,33(12):1084-1093.
- [21] 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[J].地理研究,2016,35(4):664-676.
- [22] Redhead J W, May L, Oliver T H, et al. National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610:666-677.
- [23] Hamel P, Chaplin-Kramer R, Sim S, et al. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 524:166-177.
- [24] Leh M D, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 165:6-18.
- [25] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101:119-128.
- [26] 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[J].地理科学,2016,36(4):603-611.
- [27] Yang D, Liu W, Tang L Y, et al. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182:133-143.
- [28] Zhang C Q, Li W H, Zhang B, et al. Water yield of Xitiao River Basin based on InVEST modeling[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1):50-55.
- [29] 胤汉.秦岭水文地理[M].西安:陕西人民出版社,1983.
- [30] 党双忍.秦岭简史[M].西安:陕西师范大学出版社,2019.
- [31] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响(I):近 52 年秦岭南北气候时空变化特征分析[J].中国水土保持科学,2012,10(5):56-63.
- [32] Baw-Puh F. On the calculation of the evaporation from land surface[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, 5(1):23-30.
- [33] Zhang L, Hickel K, Dawes W, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2):89-97.
- [34] 郭兆元,黄自立,冯立孝.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992.
- [35] 雷明德.陕西植被[M].北京:科学出版社,1999.
- [36] 陈姗姗.南水北调水源区水源涵养与土壤保持生态系统服务功能研究[D].西安:西北大学,2016.
- [37] 国家林业局.森林资源规划设计调查主要技术规定[Z]. 2003.