

气候变化背景下秦岭水源涵养功能时空变异特征

王辉源^{1,2}, 宋进喜^{1,2,3}, 吴琼^{1,2}

(1.西北大学城市与环境学院,西安 710127;
2.陕西省地表系统与资源环境承载力重点实验室,西安 710127;3.西北大学秦岭研究院,西安 710127)

摘要: 水源涵养功能的变化对流域生态水文及其供水安全产生重要影响,稳定良好的水源涵养功能是区域经济社会高质量发展的基础。基于 InVEST 产水量模块、水源涵养模型、逐像元线性拟合,模拟 1981—2015 年秦岭及秦岭南北水源涵养时空变异,分析水源涵养对气候变化的响应,探讨气候波动背景下水源涵养演变趋势。结果表明:(1)近 35 年来秦岭水源涵养呈下降趋势,年变化速率-1.44 mm/a,秦岭北坡水源涵养下降趋势大于秦岭南坡;(2)近 35 年来秦岭水源涵养空间变化趋势呈空间异质性,除汉江南岸玉带河上游、牧马河上游、褚河上游年均水源涵养量略有增加外,其他流域呈整体下降趋势,且秦岭中部水源涵养下降幅度大于外围区域;(3)降水减少和参考蒸散发增加是影响秦岭水源涵养量减少的主要因素,在气候暖干化的背景下,秦岭水源涵养功能有进一步下降的可能。掌握区域水源涵养功能时空变异特征,对科学评估区域用水安全、预判未来水资源变化趋势和气候变化背景下水资源管理具有指导意义。

关键词: 秦岭; 水源涵养; 气候变化; InVEST 模型; 时空变异; 驱动机理

中图分类号: S714.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0212-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.027

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Water Conservation Function of Qinling Mountains Under the Background of Climate Change

WANG Huiyuan^{1,2}, SONG Jinxi^{1,2,3}, WU Qiong^{1,2}

(1.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127; 2.Shaaxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127; 3.Institute of Qinling Mountains, Northwest University, Xi'an 710127)

Abstract: The change of water conservation function has an important impact on the ecological hydrology of the basin and the safety of water supply, A stable and good water conservation function is the foundation of the high-quality development of the regional economy and society. Based on the InVEST water yield module, the water conservation model and the pixel-by-pixel linear fitting, we simulated the temporal and spatial variation of water conservation in Qinling Mountains and the north and south slopes of Qinling Mountains from 1981 to 2015, analyzed the response of water conservation to climate change, and explored the evolution trend of water conservation under the background of climate fluctuation. The results show that: (1) The water conservation in Qinling Mountains showed a declining trend over the past 35 years, with an annual change rate of -1.44 mm, and the declining trend of water conservation on the northern slope of Qinling Mountains was greater than that on the southern slope of Qinling Mountains. (2) In recent 35 years, the trend of spatial changes in water conservation in Qinling Mountains had spatial heterogeneity, except for the upper reaches of the Yudai River, the upper reaches of the Muma River and the upper reaches of the Chu River on the suoth bank of the Han River, where the average annual water conservation increased slightly, the other river basins showed an overall downward trend, and the downward trend of water conservation in the central Qinling Mountains was greater than that in the peripheral regions. (3) Precipitation reduction and increased reference evapotranspiration were the main factors affecting the decrease of water conservation function in Qinling

Mountains. Under the background of warm and dry climate, the water conservation of Qinling Mountains may further decline. Mastering the temporal and spatial variation characteristics of regional water conservation function has guiding significance for scientific assessment of regional water security, prediction of future water resources change trend and water resources management under the background of climate change.

Keywords: Qinling Mountains; water conservation; climate changes; InVEST model; temporal and spatial variation; driving mechanism

森林具有涵养水源、调节径流、净化水质等功能^[1],尤其在水环境恶化、水污染加剧,水需求加重的当下,提升森林水源涵养功能是流域高质量发展的基础,也是当下生态水文学研究的热点。20 世纪 60 年代,我国从苏联引入水源涵养功能概念^[2-3],20 世纪 80 年代,众多学者对不同区域的森林水源涵养功能进行计量与评价^[4],对水源涵养功能定量评估小尺度和大尺度评估方法不同,小尺度方法集中在森林生态系统水源涵养功能某组成要素或者各组成要素定位观测,一般利用综合蓄水量法、模糊数学、灰色关联分析法等分析不同植被类型、不同林分结构水源涵养功能;大尺度研究主要基于利用水量平衡原理构建水文模型,定量分析评估流域或者区域生态系统水源涵养各个分量,然后探究水源涵养功能时空变异规律^[5-7]。

秦岭因其独特的地理位置,特殊的生态功能^[8],秦岭水源涵养功能变化将对流域生态水文及供水安全产生重要影响,但 20 世纪 70 年后,由于秦岭森林植被破坏,水源涵养功能降低,秦岭北坡河流 80% 成为间歇河^[9],1960—2011 年秦岭南坡金钱河年均径流深每年下降 5.675 mm^[10],秦岭野生鱼类种类和种群数量减少,水质也进一步恶化^[11]。围绕秦岭水源涵养功能许多学者做了大量研究,雷瑞德^[12]基于水分平衡原理;刘宇等^[13]基于土壤室内烘干法,计算秦岭火地塘林区华山松林、3 种土地利用类型的水源涵养功能;康艳^[14]利用 3S 技术评价秦岭山地植被水源涵养功能格局;范亚宁等^[15]、卓静等^[16]、宁亚洲等^[17]、曹明等^[18]基于 InVEST 模型分析秦岭水源涵养格局,计算近年来秦岭林区水源涵养量的变化。

但是目前针对秦岭水源涵养功能的研究偏静态描述,缺少长序列动态演变规律方面的研究,年度水源涵养功能与年度降水量同步波动,且水源涵养功能年际变化较大,如果仅选择某几个相同阶段年份水源涵养功能进行比较,以此来判断水源涵养功能动态变化结果具有随机性,不同时间段水源涵养比较往往结果不同。地理要素时空特征是围绕水源涵养研究的基础性工作,气象因子是影响水源涵养功能的决定性要素,近几十年来,秦岭气候以显著增暖为特征,在全球气候变化背景下,秦岭水源涵养如何演变,水源涵养影响因子定量评价和空间化表征都是当下亟待开展的工作。

InVEST 模型产水量模块因其数据易获取、结果

可信度高、参数调节灵活、可视化表达等优点,在国内,三江源、北京、陕西等地,在国外,英国、以色列、地中海等地都有成功的应用^[7,19-23]。为了研究结果具有更好的空间展示性和解释能力,本文选取 1981—2015 年秦岭降水数据、参考蒸散发数据、植被数据、土壤数据等,运用 InVEST 模型产水量模块、水源涵养模型、Matlab 逐像元线性拟合,计算秦岭水源涵养演变规律,分析水源涵养功能空间变化演变趋势,探讨气候变化对水源涵养功能的影响,揭示水源涵养功能演变特征,其研究成果对政府管理者和科研工作者具有实践和理论双重意义。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

陕西秦岭即“小秦岭”,地理位置 31.92°—34.53°N, 105.48°—111.03°E,秦岭北坡研究区范围参考陕西秦岭保护区范围,为保证研究区流域完整,秦岭南坡研究区范围参考汉江南岸,高程 164~3 748 m,面积 77 341 km²(图 1)。秦岭北麓气候为暖温带,秦岭南坡气候为亚热带,秦岭北坡近 45 年年均气温 10.8℃,秦岭南坡近 45 年年均气温 13.1℃,秦岭近 50 年年均降水量 505~1 268 mm。秦岭植被茂密,秦岭北坡植被以暖温带落叶阔叶林为主,秦岭南坡植被以北亚热带落叶阔叶林—常绿阔叶混交林为主,秦岭土壤类型以棕壤、暗棕壤、黄棕壤为主^[24-27]。

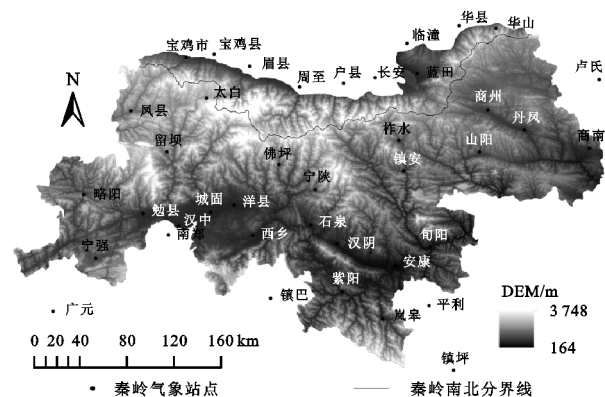


图 1 秦岭研究范围及气象站点分布

1.2 数据来源

(1)气象数据:1981—2015 年降水数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),参考蒸散发数据首先通过国家气象数据中心获取秦岭 42 个站点平均最低气温、平均最高气温、平均气温、风

速、平均相对湿度、日照时间数据,然后利用 FAO 推荐的基于彭曼—蒙蒂斯公式软件 ET Calculator V6.4 计算站点参考蒸散发数据,最后通过地统计分析克吕金插值获取参考蒸散发数据,空间分辨率 1 km。

(2) 土地利用数据:1981—2015 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 1980 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 7 期土地利用遥感监测数据,空间分辨率 1 km (<http://www.resdc.cn>)。

(3) 地形数据:DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率 90 m,基于 ArcGIS 水文分析模块获取流域、子流域矢量数据、百分比坡度(注:坡度为 0 时根据 TOPMODEL 地形指数计算处理^[28])、流域汇水量栅格数据。

(4) 土壤数据:土壤类型数据和土壤质地数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,土壤有机质数据集来源于国家青藏高原数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),土壤深度数据在土壤类型数据基础上根据陕西土壤^[27]获取秦岭土壤深度数据,植物可利用含水量数据是基于土壤质地数据和土壤有机质数据获取,土壤饱和导水率数据是基于土壤质地数据,由 Neuro Theta 软件计算获取,空间分辨率 1 km(表 1)。

表 1 不同土地利用类型下作物系数和根系深度模型参数

编号	土地利用类型	作物系数	根系深度/mm
11	水田	0.56	300
12	旱地	0.56	400
21	有林地	0.72	3000
22	灌木林	0.70	3000
23	疏林地	0.68	2000
24	其他林地	0.49	1500
31	高覆盖草地	0.69	500
32	中覆盖草地	0.62	500
33	低覆盖草地	0.47	500
41	河流	0.36	0
42	湖泊	0.37	1
43	水库	0.41	1
46	滩地	0.33	1
51	城镇	0.36	1
52	农村居民点	0.36	1
53	其他建设用地	0.35	1
61	沙滩	0.63	1
65	裸土	0.41	1
66	裸岩	0.56	1

1.3 研究方法

选取 3.8.1 版本的 InVEST 模型产水量,以年为时间尺度,投影统一为 Krasovsky_1940_Albers,空间分辨率 1 km,数据格式 TIFF,以 1981—2015 年气

象、植被;土壤等数据为基础,基于水量平衡原理,计算产水量,在此基础上结合地形指数、流速系数、土壤饱和导水率计算水源涵养量,然后利用 Matlab 矩阵分析求取 1981—2015 年逐像元的线性拟合系数^[29]。

1.3.1 InVEST 模型产水量模块 Water Yield 模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设,每个栅格单元上的降水量减去实际蒸散发量即水源供给量,栅格单元年产水量 $Y(x)$ 计算公式为:

$$Y(x) = (1 - \frac{AET(x)}{P(x)})P(x) \tag{1}$$

式中: $Y(x)$ 为栅格 x 年产水量(mm); $AET(x)$ 为栅格 x 年实际蒸散发量(mm); $P(x)$ 为栅格 x 年降水量(mm)。

$\frac{AET(x)}{P(x)}$ 采用前人^[28,30]提出的 Budyko 水热耦合平衡假设公式:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + (\frac{PET(x)}{P(x)})w \right] \frac{1}{w} \tag{2}$$

式中: $PET(x)$ 为栅格 x 年潜在蒸散发量(mm); $w(x)$ 为自然气候—土壤性质的非物理参数。

$w(x)$ 计算公式为:

$$w(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \tag{3}$$

式中: $AWC(x)$ 为栅格 x 土壤有效含水量(mm),由土壤质地和土壤深度决定; Z 为区域降水时间尺度分布,无量纲,如果降水集中在冬季时, Z 值接近于 10,如果降水集中在夏季或者季节分配较为均匀, Z 值接近于 1。

1.3.2 水源涵养量计算 水源涵养量是基于 Water Yield 计算结果,结合地形指数、土壤饱和导水率、流速系数等参数,计算土壤含水量。

$$Retention = \min(1, \frac{249}{Velocity}) \times \min(1, \frac{0.9 \times TI}{3}) \times \min(1, \frac{Ksat}{300}) \times Yield \tag{4}$$

式中: $Retention$ 为土壤水源涵养量(mm); $Velocity$ 为流速系数,采用模型参数表数据,无量纲; $Ksat$ 为土壤饱和导水率(cm/d); TI 为地形指数,无量纲。

TI 计算公式为:

$$TI = \log(\frac{D_{area}}{Soil_{dep} \times P_{slope}}) \tag{5}$$

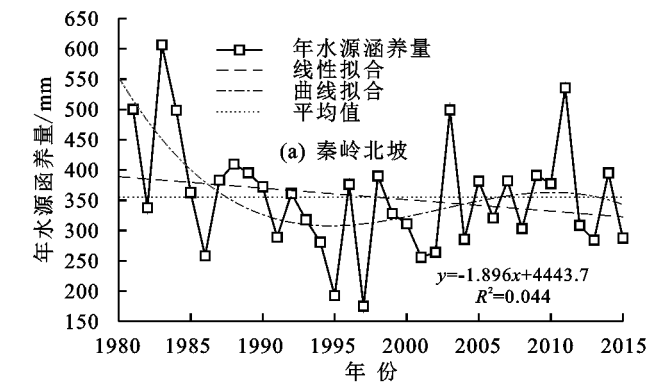
式中: D_{area} 为集水区汇水量; $Soil_{dep}$ 为土壤深度(mm); P_{slope} 为百分比坡度(%)^[31]。

2 结果与分析

2.1 过去 35 年秦岭水源涵养时空变异

由图 2 可知,1981—2015 年秦岭北坡及秦岭南坡水源涵养变化同步波动,且年际变化较大,呈下降趋势,秦岭水源涵养年际变化速率-1.44 mm/a,北

坡水源涵养年际变化速率 -1.90 mm/a ,南坡水源涵养年际变化速率 -1.38 mm/a ,北坡水源涵养减少趋势更为明显;1981—2015 年秦岭年平均水源涵养量 350.3 mm ,秦岭北坡年平均水源涵养量 354.9 mm ,秦岭南坡年平均水源涵养量 349.5 mm ,总体上秦岭北坡水源涵养量大于秦岭南坡;秦岭北坡和秦岭南坡年均水源涵养极小值都是 1997 年,极大值都是 1983



年。虽然秦岭及秦岭南北坡水源涵养呈现出减少趋势,但并非线性减少,而是“阶梯状”动态变化过程,具体表现为 3 个阶段:(1)1981—1995 年为第 1 阶段,年水源涵养量快速下降,尤其是 1983—1986 年 4 年间直线下降;(2)1995—2010 年为第 2 阶段,年水源涵养量缓慢增加;(3)2010—2015 年为第 3 阶段,年水源涵养量缓慢减少。

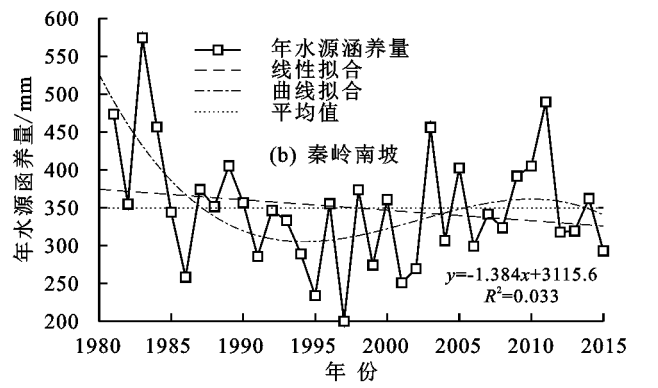


图 2 1981—2015 年秦岭南北水源涵养量

由图 3 可知,1981—2015 年秦岭水源涵养变化具有明显的空间异质性,中部明显减少,外围略有减少,主要特征表现为:(1)过去 35 年秦岭水源涵养整体上呈下降趋势,但秦岭南北水源涵养下降程度不同,秦岭北坡所有流域水源涵养明显下降,秦岭南坡玉带河上游、牧马河上游、褚河上游年均水源涵养量略有增加,年变化速率约为 0.02 mm/a ,除此以外,秦岭南坡其他流域水源涵养也呈下降趋势;(2)秦岭水源涵养明显减少流域主要集中在秦岭南北分界线两侧,秦岭北坡集中在石头河流域、黑河流域、沔河流域,秦岭南坡集中在褒河流域、太白河流域、子午河上游、乾佑河上游等流域,年变化速率约 -0.35 mm/a ,减少最为明显位于留坝县周边区域,年变化速率约 -0.42 mm/a ;(3)秦岭水源涵养略有减少区域集中在汉江干流两侧、丹江干流两侧和伊洛河干流两侧,年均变化速率约 -0.06 mm/a 。

2.2 过去 35 年气候要素时空变异

由图 4 可知,水源涵养能力高低与降水量大小密切相关,秦岭 1981—2015 年降水量的年际变化与水源涵养年际变化完全同步波动,区别仅在于降水量年变化速率 -2.21 mm/a ,水源涵养年际变化速率 -1.44 mm/a ,降水量下降幅度大于水源涵养;降水量空间变化趋势与水源涵养空间变化趋势空间分布近乎一致,降水量明显减少区域水源涵养也明显减少,降水量增加的区域水源涵养也增加,可以说明降水量是影响水源涵养最主要的因素。

秦岭 1981—2015 年年均参考蒸散发 $1\,041.2\text{ mm}$,参考蒸散发变化速率 1.34 mm/a ,秦岭水源涵养年变化速率 -1.44 mm/a ,按照线性拟合水源涵养

与参考蒸散发呈负相关;按照曲线拟合,1981—2005 年参考蒸散发呈增加趋势,2005—2015 年参考蒸散发呈减少趋势,1981—1995 年和 2010—2015 年水源涵养呈减少趋势,1995—2010 年水源涵养呈增加趋势,1981—1995 年水源涵养与蒸散发呈负相关,1995 年以后水源涵养与蒸散发呈正相关,降水量年际变化远大于参考蒸散发,参考蒸散发与降雨、温度、风速、辐射等多种气象因素密切相关,对水源涵养的影响小于降水因子。参考蒸散发空间变化呈现“一带两中心”,以佛坪为中心的周边区域和以丹凤为中心的周边区域,参考蒸散发呈减少趋势,但减少幅度小于降水量减少幅度,所以水源涵养也呈下降趋势,柞水、镇安、岚皋一带参考蒸散发呈增加趋势,但降水量减小,所以水源涵养也略微减少。

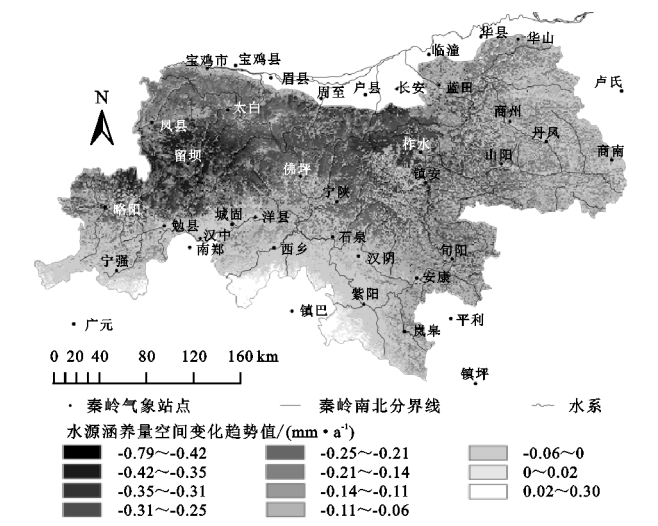


图 3 1981—2015 年秦岭水源涵养空间变化趋势

近 60 年来全球地表温度变化速率 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,中国地表温度变化速率 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[32-33],由秦岭 1981—

2015 年地表温度时空变化发现,近 35 年来秦岭地表温度变化速率 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,秦岭增温速率大于全国增温速率,气候趋于暖干化;地表温度变化速率均值为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,大于 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 为增温高值区,小于 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 为增温低值区,增温高值区主要集中在嘉陵

江流域,其次褚河流域、伊洛河流域、丹江流域,增温低值区主要集中在秦岭中部,秦岭地表温度升温速率周边区域大于中心区域,秦岭水源涵养减少速率周边区域小于中心区域,温度变化速率与水源涵养变化速率空间上区域一致,地表温度与水源涵养呈负相关。

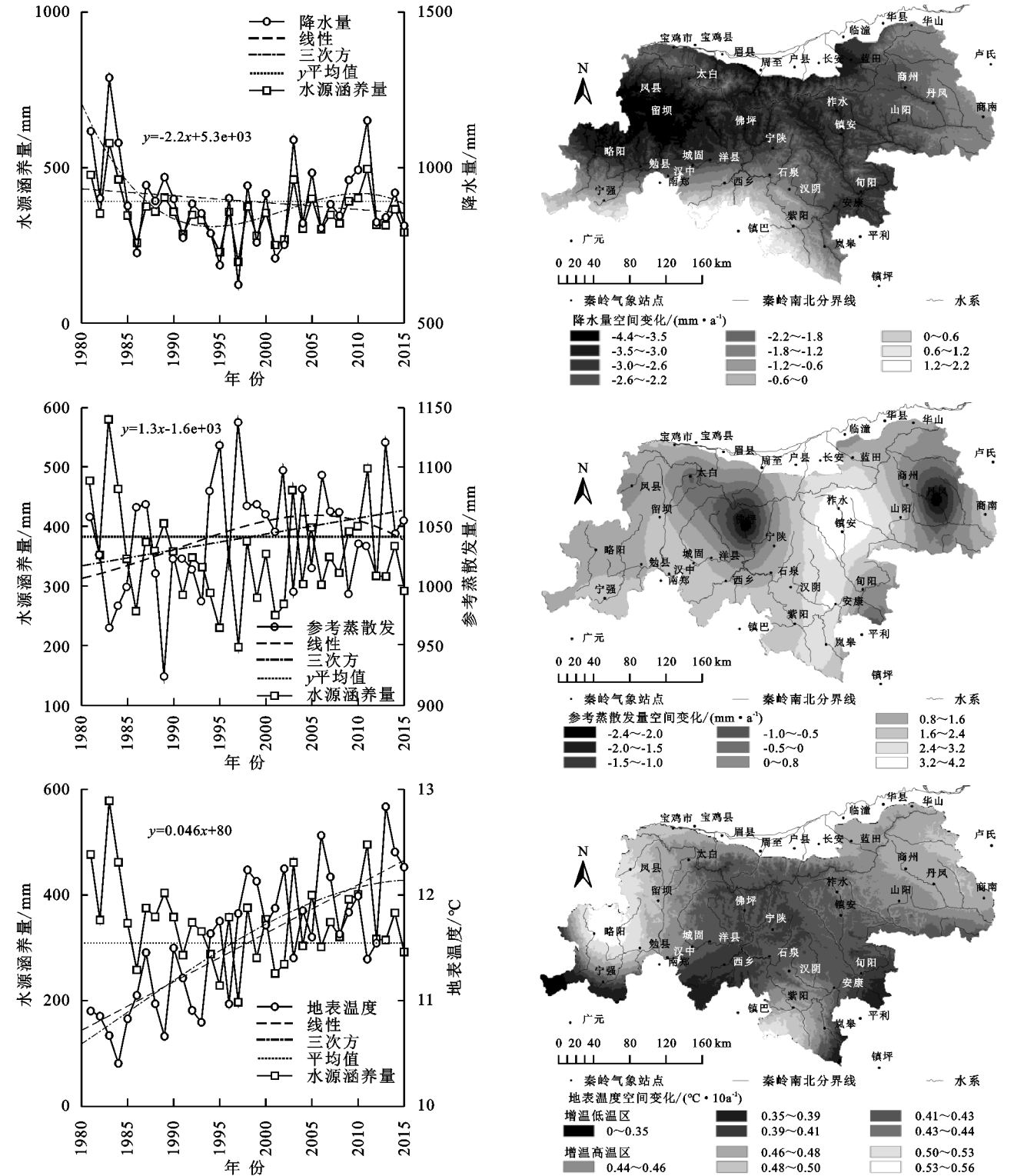


图 4 1981—2015 年秦岭时空变化

2.3 气候因素驱动下水源涵养影响因素分析

基于 MATLAB 矩阵分析,1981—2015 年逐年秦岭水源涵养栅格数据与 1981—2015 年逐年秦岭降

雨因子、参考蒸散发因子、温度因子栅格数据逐像元线性拟合,求取逐像元 B 非标准回归系数、 R^2 拟合度、Sig 显著程度,由表 2 可知,3 类气候因子显著

度都非常高,说明水源涵养与 3 类气候因子有很强的相关性,降水因子拟合度最高,参考蒸散发因子与温度因子拟合度较低,说明降水因子对水源涵养有较好的反应,降水因子与水源涵养正相关,参考蒸散发因子、温度因子与水源涵养负相关,每增加 1 mm 降水水源涵养增加 0.65 mm,每增加 1 mm 参考蒸散发水源涵养减少 1.123 mm,地表温度每增加 1 ℃ 水源涵养减少 68.638 mm。

表 2 水源涵养与气象因子影响因素分析

气候因子	<i>B</i>	<i>R</i> ²	Sig
Precip	0.650	0.991	0
<i>ET</i> ₀	−1.123	0.317	0
Temp	−68.638	0.181	0

注:*B* 为非标准回归系数;*R*² 为拟合度;Sig 为显著程度;Precip 为降雨因子;*ET*₀ 为参考蒸散发因子;Temp 为温度因子。

基于 ArcGIS 空间分析,获取秦岭每间隔 100 m 高程空间范围,高程分级范围与气象因子逐项元拟合度、非标准回归系数进行叠置分析,可反映气象因子空间影响归因。由图 5 可知,每间隔 100 m 高程梯度上,降水因子、参考蒸散发因子和温度因子与水源涵养拟合度变化较为平缓,波动不大,但降水因子、参考蒸散发因子和温度因子与水源涵养的非标准化系数变化较为剧烈,大致以 2 085 m 高程为界,在 186~2 085 m 降水因子、参考蒸散发因子、温度因子对水源涵养影响呈增加趋势,2 085~3 666 m 降水因子、参考蒸散发因子、温度因子对水源涵养影响呈减少趋势。气象因子对水源涵养影响空间格局,主要原因是森林的垂直分布变化和降水随高程非线性变化引起的,秦岭 2 000 m 以上为核心保护区,186~2 000 m 随着高程增加,森林生态系统受人为干扰逐渐减少,植被覆盖度越来越高,耕地和建设用地逐渐减少,林地逐渐增加,落叶阔叶栓皮栎林和落叶阔叶尖齿栎林逐渐占主导地位,降水也随着高程增加而增加,生态系统水源涵养功能逐渐增强,降水因子、参考蒸散发因子、温度因子对水源涵养影响逐渐增加,2 000~3 666 m 随着高程增加,降水逐渐减少,坡度逐渐增加,落叶尖齿栎林带和落叶阔叶桦木林逐渐减少,针叶云杉林、针叶冷杉林逐渐增加,且出现高山草甸和高山积雪,生态系统水源涵养功能逐渐减弱,降雨因子、参考蒸散发因子、温度因子对水源涵养影响逐渐减少。

3 讨论

秦岭是我国中部重要的生态屏障,然秦岭生态环境却属于中度脆弱,且人类不合理的经济开发行为加剧了生态环境脆弱性^[34],保护好、利用好秦岭生态环

境,对区域可持续发展和全国经济社会发展都具有重要意义。水源涵养是秦岭主要的生态水文功能,维持沿线河流生产、生活、生态用水,目前针对秦岭水源涵养功能的研究主要以静态评估居多,缺少长时间序列水源涵养功能动态定量化研究。

(1)森林生态系统水源涵养方法众多,基于不同的研究方法结果差异较大,仅是研究结果变化趋势相同,但各结果之间难以相互印证。InVEST 模型因其结构简单,数据易获取,被广泛应用于水源涵养功能计算。但是 InVEST 模型以年为时间尺度,弱化了降水、参考蒸散发时空分配,水源涵养的计算与季节常数 *Z* 密切相关,并且研究区统一 *Z* 值弱化了秦岭南北降水季节分配差异,研究结果缩小了南北水源涵养功能差异。加之为保证研究区流域完整及河流南北水源涵养格局分析,秦岭南坡研究区范围包括汉江南岸,研究区大于秦岭保护区范围,秦岭南坡纬度越低,降水量越大,水源涵养量较高,这些都进一步缩小了秦岭南北水源涵养量差距。

(2)目前的 InVEST 模型把枯枝落叶层归纳到土壤层中,InVEST 模型考虑了土壤水对地下水的补给,但忽略了地下水对土壤水的补给,因此基于 InVEST 模型计算水源涵养量往往比实际值偏大。目前缺少土壤水实测资料,基于遥感的土壤水数据空间分辨率较低,阻碍了模型的验证。

(3)数据质量引起的不确定性,秦岭山地高山观测缺乏,导致山地水源涵养数据估算结果存在很大不确定性。首先基于 Penman—Monteith 方程,用于估算蒸散量,需要大量数据,包括但不限于太阳辐射、风速、最高温度、最低温度等数据,现有的气象数据难以完全反映全部气象特征。其次,虽然获取到秦岭 42 个站点气象数据,气象站点分布均匀,能够反映秦岭气象概况,但特别是降水、蒸发与海拔高度的关系,并不满足线性垂直递减变化,基于现有气象数据会影响计算结果准确性,后期考虑基于气象雷达图数据修正现有气象栅格数据。

(4)气象因子是影响水源涵养功能最重要的因子,量化气候变化和地表覆盖变化对水源涵养功能的影响一直是森林水文学研究前沿。未来气候是趋于暖干化还是暖湿化? 暖干化或暖湿化叠加植被覆盖变绿是否导致未来水资源安全面临越来越大压力? 单独增加植被覆盖未必会增加水源涵养功能,植被种类的改变也可能导致水源涵养状态的改变。

(5)水源涵养功能作为生态系统主要服务功能,一方面与降水量息息相关;另一方面与生态系统组

分、结构、格局密切相关。尤其是人类不合理的经济行为,造成水土流失、植被破坏、湿地减少,导致水源涵养功能降低。水利发展的整体性、完整性及与山水林田湖的格局不匹配也会降低水源涵养功能。

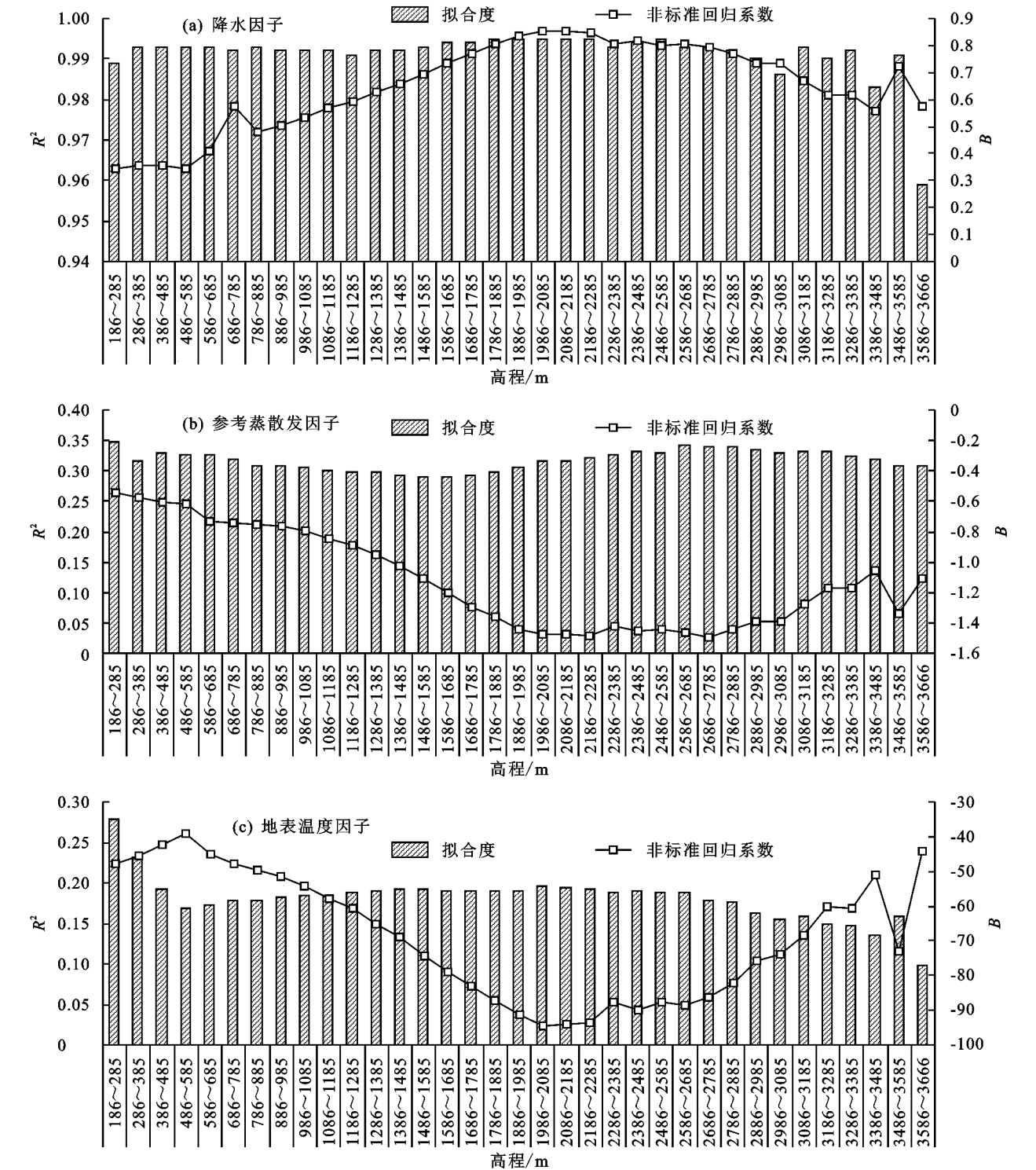


图 5 气象因子影响因素空间拟合度与非标准化系数

4 结论

(1)1981—2015 年秦岭年平均水源涵养量 350.3 mm,1983 年水源涵养量最大,1997 年水源涵养量最低;秦岭水源涵养呈下降趋势趋势,年际变化速率为 -1.44 mm/a ,秦岭及秦岭南北坡水源涵养同步波动,呈下降趋势,且秦岭北坡下降幅度大于秦岭南坡。

(2)秦岭水源涵养时空特征主要表现为时间上水

源涵养量呈“非线性,阶梯状”动态变化过程,快速下降阶段 1981—1995 年,缓慢增加阶段 1995—2010 年,缓慢减少阶段 2010—2015 年;空间上水源涵养变化呈现异质性,除秦岭南坡玉带河上游、牧马河上游、褚河上游年均水源涵养量略有增加,其他流域都呈减少趋势,且秦岭外围区域减少幅度小于秦岭中部。

(3)人类活动加剧引起土地利用变化势必导致水

资源时空重新分配,人类不合理的经济行为对森林和草地的破坏降低了生态系统水源涵养功能。因研究区域较大,空间分辨率较低,遥感影像对人类活动的影响刻画不足,基于现在空间分辨率下,降水减少和蒸散发增加是秦岭水源涵养减少的主要原因。

参考文献:

[1] 晋建霞. 秦岭林区流域森林生态系统对水质的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[2] 莫尔察诺夫,杨山.森林的水源涵养作用[J].林业科学,1960(2):161-174.

[3] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.

[4] 张嘉宾.关于西双版纳傣族自治州森林涵养水源功能的计量和评价[J].林业资源管理,1982,1:29-33.

[5] 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[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.

[6] 张媛媛.1980—2005 年三江源区水源涵养生态系统服务功能评估分析[D].北京:首都师范大学,2012.

[7] 吕乐婷,任甜甜,孙才志,等.1980—2016 年三江源国家公园水源供给及水源涵养功能时空变化研究[J].生态学报,2020,40(3):993-1003.

[8] 党双忍.秦岭简史[M].西安:陕西师范大学出版社,2019.

[9] 雷瑞德, 尚廉斌.加强植被建设保护秦岭生态环境[C]//中国科学技术出版社.中国科协 2000 年学术年会论文集.西安:西安交通大学,2000.

[10] 马新萍,白红英,冯海鹏,等.52 年来秦岭南北径流变化对比及影响因素[J].干旱区地理,2013,36(6):1032-1040.

[11] 周小愿,金卫荣,韩亚慧,等.秦岭生态保护区野生鱼类的物种多样性及其保护对策[J].山地农业生物学报,2010,29(5):403-408.

[12] 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):19-34.

[13] 刘宇,郭建斌,邓秀秀,等.秦岭火地塘林区 3 种土地利用类型的土壤潜在水源涵养功能评价[J].北京林业大学学报,2016,38(3):73-80.

[14] 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.

[15] 范亚宁,刘康,陈姗姗,等.秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局[J].水土保持通报,2017,37(2):50-56.

[16] 卓静,何慧娟,邹继业.近 15 年秦岭林区水源涵养量变化特征[J].干旱区研究,2017,34(3):604-612.

[17] 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[J].生态学杂志,2020,39(9):3080-3091.

[18] 曹明,李俊生,王伟,等.基于 InVEST 与倾向评分匹配

模型评估秦岭国家级自然保护区水源涵养服务保护成效[J].生物多样性,2021,29(5):617-628.

[19] 余新晓,周彬,吕锡芝,等.基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J].林业科学,2012,48(10):1-5.

[20] 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.

[21] 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.

[22] Terrado M, Acuna V, Ennaanay D, et al. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized mediterranean basin [J].Ecological Indicators,2013,37:199-209.

[23] Sánchez-Canales M, López Benito A, Passuello A, et al. Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed [J]. Science of the Total Environment,2012,440:140-153.

[24] 李双双,芦佳玉,延军平,等.1970—2015 年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义[J].地理学报,2018,73(1):13-24.

[25] 王晓玲,任燕.秦岭山区近 50 年降水差异及可能局地成因探讨[J].气候与环境研究,2012,17(6):911-918.

[26] 孙华,白红英,张清雨,等.秦岭南北地区植被覆盖对区域环境变化的响应[J].环境科学学报,2009,29(12):2635-2641.

[27] 郭兆元,黄自立,冯立孝.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992.

[29] Yin L C, Wang X F, Feng X M, et al. A comparison of SSEBop-Model-Based evapotranspiration with eight evapotranspiration products in the Yellow River Basin, China [J].Remote Sensing,2020,12(16):e2528.

[28] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[J].大气科学,1981,5(1):23-30.

[30] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J].Water Resources Research,2004,40(2):89-97.

[31] 孔凡哲,芮孝芳.一种地形指数计算方法在 Topmodel 洪水模拟计算中的应用[J].水文,2003(3):16-19.

[32] 秦大河.气候变化科学与人类可持续发展[J].地理科学进展,2014,33(7):874-883.

[32] 卞娟娟,郝志新,郑景云,等.1951—2010 年中国主要气候区划界线的移动[J].地理研究,2013,32(7):1179-1187.

[34] 潘景璐.基于生境压力的发展对秦岭生物多样性保护影响研究[D].北京:北京林业大学,2013.