•研究报告•

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

曹明^{1,2}, 李俊生^{1,2}, 王伟^{1,2*}, 夏聚一^{1,2,3}, 冯春婷^{1,2}, 付刚^{1,2}, 黄文婕^{1,2}, 刘方正^{1,2}

1. 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院生物多样性研究中心, 北京 100012; 3. 中国人民大学环境学院, 北京 100872

摘要: 自然保护区在保障水源涵养等生态系统服务方面发挥了重要作用, 对区域水资源的可持续利用具有重要意义。然而, 自然保护区水源涵养服务保护成效的主要影响因素仍然不清, 不利于自然保护区的有效管理和区域可持续发展目标的实现。本文拟探讨: (1)秦岭区域水源涵养服务的总体情况; (2)自然保护区对水源涵养服务的保护成效; (3)自然保护区水源涵养服务保护成效的主要影响因素是什么。本文采用InVEST模型计算秦岭区域19个国家级自然保护区2010–2015年的水源涵养量, 基于倾向评分配比法研究了自然保护区水源涵养服务保护成效, 并通过随机森林回归判断自然保护区水源涵养服务保护成效的主要影响因素。研究结果表明, 虽然在2010–2015年秦岭区域水源涵养服务整体降低, 但与自然保护区外的配对样本相比, 大多数自然保护区(63.16%)水源涵养服务保护成效显著($N = 12$, $P < 0.05$); 少数保护区(26.32%)在减缓水源涵养服务降低的作用不如自然保护区外($N = 5$, $P < 0.05$); 也有个别自然保护区(10.52%)对水源涵养服务保护成效不明显($N = 2$, $P > 0.05$)。从主要影响因素来看, 自然保护区水源涵养服务保护成效主要受降水量变化和自然保护区资金投入的影响。结果显示: (1)2010–2015年间秦岭区域水源涵养量减少较为明显, 但总体来看自然保护区在减缓水源涵养服务降低方面取得了积极成效。(2)降水量变化对水源涵养服务保护成效起到主导作用; (3)管理因素也对保护区水源涵养服务保护成效有一定影响, 在管理因素中资金投入的大小对水源涵养服务保护效果影响最大。因此, 建议进一步增加资金投入, 以提升自然保护区水源涵养服务的保护成效。

关键词: 保护成效评估; 倾向评分配比; 生态系统服务; 随机森林; 资金投入

曹明, 李俊生, 王伟, 夏聚一, 冯春婷, 付刚, 黄文婕, 刘方正 (2021) 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. 生物多样性, 29, 617–628. doi: 10.17520/biods.2020271.

Cao M, Li JS, Wang W, Xia JY, Feng CT, Fu G, Huang WJ, Liu FZ (2021) Assessing the effectiveness of water retention ecosystem service in Qinling National Nature Reserve based on InVEST and propensity score matching model. Biodiversity Science, 29, 617–628. doi: 10.17520/biods.2020271.

Assessing the effectiveness of water retention ecosystem service in Qinling National Nature Reserve based on InVEST and propensity score matching model

Ming Cao^{1,2}, Junsheng Li^{1,2}, Wei Wang^{1,2*}, Juyi Xia^{1,2,3}, Chunting Feng^{1,2}, Gang Fu^{1,2}, Wenjie Huang^{1,2}, Fangzheng Liu^{1,2}

1 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 Biodiversity Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

3 School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872

ABSTRACT

Aims: Nature reserves (NRs) play an important role in ensuring ecosystem services such as water retention, which are of great significance for the sustainable use of regional water resources. However, the main factors influencing the

收稿日期: 2020-07-07; 接受日期: 2020-11-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0503304)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wang.wei@craes.org.cn

<https://www.biodiversity-science.net>

effectiveness of water retention in NRs are still unclear, which is not conducive to the effective management of NRs and the achievement of regional sustainable development goals. Therefore, the aims of this research are to explore: (1) the overall situation of water retention services in Qinling Mountains; (2) the conservation effectiveness of water retention services in NRs; and (3) the key influencing factors of the conservation effectiveness of water retention services in NRs.

Methods: Here, we used the InVEST model to calculate the water retention between 2010 and 2015 in Qinling Mountains related to 19 national nature reserves. Based on the propensity score matching approach, we assessed the conservation effectiveness of these nature reserves in ensuring the ecosystem service of water retention. We then used the random forest regression model to identify the factors that mainly affect the conservation effectiveness.

Results: The results showed that the water retention ecosystem service in Qinling Mountains generally reduced between 2010 and 2015. Compared with the matched samples outside the NRs, most reserves (63.16%) showed significant positive effects on water retention ($N = 12$, $P < 0.05$), while some reserves (26.32%) showed significant negative effects ($N = 5$, $P < 0.05$). There were also two reserves (10.52%) that had no significant effects on water retention ($N = 2$, $P > 0.05$). In addition, the conservation effectiveness of reserves in ensuring water retention was mainly affected by changes in precipitation and funding investment.

Conclusions: (1) Between 2010 and 2015, the water retention rate was reduced remarkably in Qinling Mountains, but the NRs had achieved positive effectiveness in mitigating the reduction of water retention in general; (2) Changes in precipitation play a dominant role in sustaining the ecosystem service of water retention; and (3) The management factors also affect the conservation effectiveness to certain extent, in which the amount of investment is the most important. Therefore, we suggest increasing capital investment in the future to improve the conservation effectiveness of water retention service of NRs.

Key words: conservation effectiveness assessment; propensity score matching; ecosystem services; random forest model; funding investment

生态系统服务是维持人类与动植物生存的自然环境基础,自工业革命以来,全球范围内生物多样性不断丧失,生态系统服务能力也在不断下降(Briggs, 2016)。其中,水源涵养是生态系统的一种重要调节服务(Finlayson et al, 2005),是指生态系统通过植物冠层截留、枯落物截留、土壤入渗蓄积等方式保持水分的能力与过程,对调节水分循环、防止水旱灾害、增加水资源补给具有重要意义^①。水源涵养能力的强弱在一定程度上可反映整个区域的生态系统状况。建立自然保护区是目前公认的保护生物多样性和维持生态系统功能的最有效手段(Dudley, 2008; Li et al, 2020)。自然保护区不仅对特定的保护对象起着保护作用,对生态系统服务的维持也有重要意义(Xu et al, 2017)。准确科学地评估自然保护区对水源涵养服务的保护成效及其影响因素,对自然保护区的发展与科学管理具有重要意义。

为了探索创新的自然保护区管理解决方案,研究人员对将生态系统服务纳入自然保护区管理和决策以实现区域可持续发展的想法越来越感兴趣(Bridgewater & Babin, 2017; Schirpke et al, 2017)。生

态系统服务的方法为自然保护区生物多样性保护和生态系统管理决策提供了更好的支持(Ingram et al, 2012)。针对生态系统服务的研究较多地关注于区域尺度、国家尺度以及全球尺度,无论从生态系统类型、研究尺度还是模型都较为成熟(巩杰等, 2020),其中InVEST模型在研究中应用最为广泛(黄从红等, 2013)。随着生态系统服务研究的日益成熟,人们开始关注以自然保护区为单元的生态系统服务研究,但多数研究集中于静态地评估自然保护区生态系统服务功能或价值(金辛, 2015; 缪建群等, 2017)及其在不同时间序列上的变化情况(金良, 2008; 吴楠等, 2019),而对于自然保护区对生态系统服务保护效果的研究较少。有研究者开始探索自然保护区对生态系统服务是否存在保护效果。例如,于博威等(2016)将海南岛自然保护区内外1988–2008年的土壤保持功能进行了比较,发现保护区对土壤保持功能的保护效果显著优于保护区外。在水源涵养服务方面,大多数研究是在一个区域尺度上估算水源涵养服务(于法展等, 2014, 邢汉, 2016^②),识别水源涵养服务时空分布的差异(宁亚洲等, 2020),但在区域自然保护区对水源涵养服务

① 荣检 (2017) 基于 InVEST 模型的广西西江流域生态系统产水与固碳服务功能研究. 硕士学位论文, 广西师范学院, 广西桂林.

② 邢汉 (2016) 基于“3S”技术的天马自然保护区森林土壤涵养水源功能研究. 硕士学位论文, 安徽农业大学, 合肥.

的保护成效及其影响因素等方面的研究几乎为空白。

秦岭是我国地理和气候的南北分界线,是众多河流补给区和重要水源涵养区,也是周边城市重要的水源地。秦岭区域为我国心脏地带重要的生态屏障,是我国自然保护区最集中的区域之一,其中国家级自然保护区更是保护生物多样性和维持生态系统服务的核心区域。因此对秦岭区域国家级自然保护区水源涵养服务的保护成效进行准确、科学的评估具有十分重要的意义。目前,秦岭区域水源涵养服务研究有一定的基础(卓静等, 2015; 范亚宁等, 2017; 宁亚洲等, 2020),但多集中于区域水源涵养功能量或价值量的计算,针对自然保护区对水源涵养服务保护成效的关注不足。为此,本文以秦岭区域19个国家级自然保护区为研究对象,通过计算自然保护区内外2010–2015年的水源涵养量变化情况,并结合倾向评分匹配模型、随机森林回归分析等方法,以期探讨以下问题: (1)秦岭区域水源涵养服务的总体情况如何; (2)自然保护区对水源涵养服务的保护成效如何; (3)自然保护区水源涵养服务保护成效的主要影响因素是什么。以期为未来自然保护区精细化管理提供参考。

1 研究区概况

秦岭山脉是我国暖温带和亚热带的过渡带,南坡属亚热带季风气候,北坡属暖温带半湿润气候。整个山脉走势西高东低,主脊偏北,北坡陡峻,南坡平缓。秦岭区域河流众多,多呈南北走向,以秦岭主脊为分水岭,南坡属于长江流域,北坡属于黄河流域。秦岭地区是中国35个生物多样性保护优先区域之一,位于我国古北界和东洋界动物的交汇过渡地带和分界线,分布有国家一级保护动物大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、川金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)、羚牛(*Budorcas taxicolor*)、朱鹮(*Nipponia nippon*)等珍稀濒危物种。本文所研究的秦岭区域主要为秦岭生物多样性保护优先区(李俊生等, 2016)范围所涉及的西安、商洛等11个地级市中的50个县级行政区(图1)。截至2019年底,该区域已建立国家级自然保护区25个,其中18个陆生野生动植物和森林生态系统自然保护区,1个地质遗迹自然保护区,6个水生野生生物自然保护区。本文主要以18个保护陆生野生动植物和森林生态系统为主的以及1个

图1 秦岭区域的国家级自然保护区分布图

Fig.1 Distribution map of national nature reserves in Qinling Mountains

保护地质遗迹的自然保护区为研究对象。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文以水源涵养量来表征水源涵养服务大小。水源涵养量计算采用InVEST模型,模型参数及数据来源见表1。对获取的原始数据进行整理,将不同分辨率栅格数据进行重采样至30 m分辨率,进行统一投影。

2.2 秦岭区域水源涵养服务评估

InVEST模型是由斯坦福大学、大自然保护协会(The Nature Conservancy, TNC)和世界自然基金会(World Wildlife Fund, WWF)联合开发的生态系统服务功能评估模型。该模型适用于全球范围河流流域或景观尺度上生态系统服务功能的评估,模型允许用户输入研究地区相关数据,具有简单便捷、操作灵活、可推广性强、输出结果具有较强空间表达能力等特性,在国内外广泛应用于生态系统服务功能评估(唐尧等, 2015)。考虑到秦岭区域19个自然保护区晋升国家级自然保护的时间均在2006年12月之前;再加上2010–2015年环境保护部开展了全国生态状况变化遥感调查与评估项目,数据来源可靠,因此,我们以2010年作为此次评估的起始年份,对2010–2015年秦岭区域各自然保护区水源涵养服务的变化进行了分析,以评估各自然保护区在水源涵养服务方面的保护成效。

本文根据InVEST模型的产水模块获得产水量,

再通过地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对产水量进行修正获得水源涵养量(包玉斌等, 2016)。具体算法如下:

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

式中: Retention为水源涵养量(mm); Velocity为流速系数; *TI*为地形指数, 无量纲, 由式(2)计算; *K_{sat}*为土壤饱和导水率(cm/d), 采用Vereecken模型(廖凯华等, 2012; 刘继龙等, 2013), 由式(3)计算; Yield为产水量, 由InVEST模型产水模块计算(Sharp et al, 2015)。

$$TI = \lg\left(\frac{\text{Drainage_Area}}{\text{Soil}_{\text{Depth}} \times \text{Percent}_{\text{Slope}}}\right) \quad (2)$$

式中: Drainage_Area 为集水区栅格数量, 无量纲; Soil_{Depth} 为土壤深度(mm); Percent_{Slope} 为百分比坡度。

$$\ln K_{sat} = 20.62 - 0.96 \ln \text{clay} - \ln \text{sand} - 0.46 \ln \text{OM} - 8.43\rho \quad (3)$$

式中: clay为土壤粘粒含量; sand为砂粒含量; OM为有机质含量; ρ为容重。

由于研究区只包含了商洛市一个完整的地级市, 本文根据陕西省水资源公报显示的商洛市2010年和2015年产水量数据验证InVEST模型计算的产水量。

表1 数据获取来源与参数计算
Table 1 Data sources[®] and parameters

数据类型 Data type	来源与获取方法 Data sources
土地利用数据(2010, 2015年) Land use data (2010, 2015)	2010–2015年全国生态状况变化遥感调查与评估项目 2010–2015 Remote Sensing Investigation and Assessment Project of Ecological Status Change in China
数字高程模型数据 Digital elevation model (DEM) data	地理空间数据云GDEM V2数据(30 m分辨率) GDEM V2 data from Geospatial data cloud with 30 m resolution
子流域数据 Sub-watersheds data	根据数字高程模型数据进行水文提取 Hydrological information extraction based on DEM data
降雨数据 Precipitation data	数据来源于资源环境数据云平台(分辨率1 km) Precipitation data with 1 km resolution obtained from the website of www.resdc.cn
蒸散数据 Evapotranspiration	数据来源于谷歌地球引擎平台, MOD16A2产品(500 m分辨率) Data were extracted from the MOD16A2 products (500 m resolution), which were obtained from the Google Earth Engine.
土壤数据 Soil data	数据来源于第二次土壤普查, 国家青藏高原数据科学中心(上官微和戴永久, 2013) Data were obtained from the second soil census of National Tibetan Plateau Data Center (Shangguan & Dai, 2013)
植物有效含水量 Plant available water capacity (PAWC)	根据土壤普查数据采用土壤质地数据进行计算得到 The data were calculated from the soil texture data based on the soil census.
根系深度 Root depth	第二次土壤普查土壤剖面, 结合研究区文献校正得到(刘兆谦, 1983; 游松财等, 2009; 上官微和戴永久, 2013) Adjusted from the soil profile in the second soil census combined with related literature in the study area (Liu, 1983; You et al, 2009; Shangguan & Dai, 2013)
Zhang系数 Zhang coefficient	根据自然径流反复计算, 结合研究区文献(范亚宁, 2017 ^① ; 魏星涛, 2018 ^②)反复校验得到, 估算数值为4.35 According to the repeated calculation of natural runoff, combined with repeated verification of the literature in the study area ^{①②} , the estimated value was 4.35.
流速系数 Velocity coefficient	查阅相关文献(包玉斌等, 2016) Extracted from related literature (Bao et al, 2016)
地形指数 Terrain index	根据数字高程模型数据计算 Calculated from DEM
土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity	根据Vereecken模型计算(Vereecken et al, 1992) Calculated according to Vereecken model (Vereecken et al, 1992)
自然保护区边界 Nature reserves' boundaries	生态环境部 Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China
自然保护区相关管理数据 Management data of nature reserves	现场调查, 查阅资料 On-site investigation and archives searching
路网数据 Roads data	Open Street Map (www.openstreetmap.org)

① 范亚宁 (2017) 秦岭北麓及周边生态系统水源涵养与水质净化功能评估. 硕士学位论文, 西北大学, 西安.
② 魏星涛 (2018) 基于 InVEST 模型的祁连山南坡水源涵养功能研究. 硕士学位论文, 青海师范大学, 西宁.

2.3 统计分析

2.3.1 国家级自然保护区内外水源涵养服务对比

首先, 将秦岭区域划分为1 km × 1 km的网格, 自然保护区内网格作为试验样本。为了避免保护区的溢出效应影响, 本文定义自然保护区外0–10 km范围内的区域为溢出效应区域(Zhao et al, 2019), 以溢出效应区域以外的秦岭区域网格作为对照样本。本文采用倾向评分分配比模型消除自然保护区内外网格的环境因子差异, 使自然保护区内外样本尽量在相同条件下进行比较。倾向评分分配比模型是指在给定条件下, 研究对象被分配到试验组或对照组的条件概率(Rosenbaum, 1989), 主要用于试验组中协变量因素的事后均衡处理, 对协变量因素进行类似随机化的均衡处理(陈亨贵等, 2017)。倾向评分分配比是从对照组中选取与试验组中倾向评分相同或相近的对象进行配对, 从而使组间的协变量达到均衡(张亮等, 2012; 陈亨贵等, 2017)。本文以高程、坡度、坡向、土壤类型4个因子作为协变量, 通过倾向评分模型对保护区内外网格进行一对一匹配, 卡钳值(δ)设为0.02 (Austin & Mamdani, 2006; Chiu et al, 2016), 在R 3.5.3语言MatchIt包中完成。本文以水源涵养量变化率 $Ratio_i$ 作为比较的指标, 其算法如下:

$$Ratio_i = \frac{Retention_{i(2015)} - Retention_{i(2010)}}{Retention_{i(2010)}}$$

式中: $Ratio_i$ 为第*i*个网格水源涵养量变化率, $Retention_{i(2015)}$ 为2015年第*i*个网格的水源涵养量, $Retention_{i(2010)}$ 为2010年第*i*个网格的水源涵养量。

计算完成每个配对网格水源涵养量变化率之后, 采用Wilcoxon符号秩检验分析保护区内外水源涵养量变化率是否存在显著性差异, 在SPSS 26.0中完成。最后用单个保护区内外配对样本水源涵养量变化率的差异平均值 μ 表示该保护区的保护成效, 其算法如下:

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} (insideRatio_i - outsideRatio_{i1})}{N_j}$$

式中: μ_j 表示第*j*个保护区水源涵养服务保护成效, $insideRatio_i$ 表示第*j*个保护区内第*i*个网格水源涵养量变化率, $outsideRatio_{i1}$ 表示第*j*个保护区外第*i*个网格的配对样本水源涵养量变化率, N_j 表示第*j*个保护

区的配对网格数量。

2.3.2 国家级自然保护区水源涵养服务保护成效的影响因素

本文选取可能影响保护区保护效果的因素, 分为自然因素和管理因素两类。自然因素选取保护区总降水量变化和平均海拔高度两个因素; 管理因素选取保护区每平方公里巡护人员的数量、每平方公里工作人员数量、保护区每年资金投入、保护区建立时长、保护区内路网密度(2015年数据)、保护区形状特征等6个因素。其中工作人员与巡护人员数量(2015年数据)、资金投入(2017年数据)、保护区建立时长(自保护区始建年份至2015年)。上述数据来自我们2019年6–11月开展的秦岭19个自然保护区实地调查, 并通过查阅各个保护区的历史档案资料获得。由于2017年19个自然保护区中资金投入数据统计较为齐全, 故资金投入使用2017年数据。此外, 由于河南伏牛山国家级自然保护区分为多个管理片区, 各片区管理机构档案资料情况不统一, 评估使用了黑烟镇管理局的数据。保护区的形状特征采用景观指数中的形状指数(LSI)表示(李斌和张金屯, 2010)。

然后, 将秦岭各保护区水源涵养服务保护成效 μ 与各项自然、管理影响因素进行Spearman相关分析, 在SPSS 26.0中完成。最后, 本文通过随机森林回归模型筛选出对自然保护区水源涵养服务保护效果产生影响的因素, 并判断这些因素的重要程度(Grömping, 2009), 在R 3.5.3语言randomForest包中完成。

3 结果

3.1 秦岭区域与国家级自然保护区水源涵养服务总体分布情况

基于陕西省水资源公报与模型计算的结果精度验证情况显示, 商洛市2010年和2015年的产水量分别为68.41亿 m^3 和31.08亿 m^3 , 而本文模型所计算的2010年和2015年商洛市产水量分别为68.30亿 m^3 和30.35亿 m^3 , 与公报统计的产水量之间的误差分别为0.1%和2.4%, 总体精度较为准确。

基于模型计算结果, 秦岭区域2010年与2015年水源涵养量在空间分布上大体相似: 水源涵养量较高的区域主要分布在山区, 而在北部和东南部城市区域水源涵养量较低, 总体呈现南坡高北坡低的格

局(图2)。且整个秦岭区域2015年水源涵养量相比于2010年有所降低。

秦岭区域19个国家级自然保护区中,桑园在2010年($2,171.67\text{ m}^3/\text{ha}$)和2015年($1,429.55\text{ m}^3/\text{ha}$)每公顷水源涵养量最高,其次是太白山;而单位面积水源涵养量最低的是南阳恐龙蛋化石群国家级自然保护区,2010年为 $312.49\text{ m}^3/\text{ha}$,2015年仅为

$110.43\text{ m}^3/\text{ha}$ (图3)。在2010–2015年保护区水源涵养量总体呈减少趋势,其中南阳恐龙蛋化石群国家级自然保护区每公顷水源涵养量减少比例最大(64.7%),其次是伏牛山(62.1%)和宝天曼(59.3%),周至减少比例最小(24.0%) (图3)。

3.2 自然保护区水源涵养服务保护成效

总体来看,2010–2015年水源涵养量变化率在

图2 秦岭区域水源涵养量空间分布图。(a) 2010年; (b) 2015年
Fig.2 The spatial distribution map of water retention in Qinling Mountains. (a) 2010; (b) 2015.

图3 秦岭区域19处国家级自然保护区单位面积水源涵养量分布图(m^3/ha)
Fig. 3 Water retention of 19 national nature reserves in Qinling Mountains (m^3/ha)

表2 秦岭19处自然保护区2010–2015年水源涵养量变化率内外配对Wilcoxon符号秩检验

Table 2 Paired Wilcoxon sign rank tests for the change rate of water retention of 19 national nature reserves in Qinling region between 2010 and 2015

自然保护区 Nature reserve	对比结果 Comparison results (E)	<i>N</i>	<i>P</i>	自然保护区 Nature reserve	对比结果 Comparison results (E)	<i>N</i>	<i>P</i>
周至 Zhouzhi	+	358	0.000**	太白山 Taibaishan	+	185	0.006**
汉中朱鹮 Hanzhong Crested Ibis	+	349	0.000**	天华山 Tianhuashan	+	170	0.000**
观音山 Guanyinshan	+	97	0.000**	小陇山 Xiaolongshan	–	199	0.000**
佛坪 Foping	+	223	0.000**	紫柏山 Zibaishan	–	110	0.009**
黄柏塬 Huangbaiyuan	+	108	0.000**	宝天曼 Baotianman	–	53	0.000**
老县城 Laoxiancheng	+	67	0.020*	伏牛山 Funiushan	–	471	0.000**
长青 Changqing	+	178	0.000**	南阳恐龙蛋化石群 Nanyang Dinosaur Egg Fossil	–	650	0.000**
牛背梁 Niubeiliang	+	81	0.000**	摩天岭 Motianling	不显著 Nonsignificant	49	0.689
平河梁 Pingheliang	+	140	0.000**	小秦岭 Xiaoqinling	不显著 Nonsignificant	132	0.213
桑园 Sangyuan	+	82	0.000**	总体 Overall	+	3,721	0.018**

E为保护区水源涵养变化率内外配对样本对比结果: +表示保护区内水源涵养量减少程度低于保护区外, –表示保护区内水源涵养量减少程度高于保护区外, “不显著”表示自然保护区内外无显著差异; *N*为配对样本个数。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

E is the paired comparison of the change rate of water retention inside and outside nature reserves. + indicates the changes of water retention within the reserve are better than that outside the reserve; – indicates the changes of water retention within the reserve are worse than that outside the reserve; and “nonsignificant” indicates that there is no significant difference in the changes of water retention inside and outside the reserves. *N* is the number of matched samples. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

图4 秦岭国家级自然保护区内外水源涵养量变化率差值分布图。A组表示自然保护区内水源涵养量减少程度低于自然保护区外; B组表示自然保护区内水源涵养量减少程度高于保护区外; C组表示自然保护区内外水源涵养变化无显著差异。

Fig. 4 Difference of changes in water retention inside and outside nature reserves in Qinling Mountains. Group A shows that the changes of water retention inside the nature reserves are better than that outside nature reserves; Group B shows that the changes of water retention inside the nature reserves are worse than that outside nature reserves; Group C shows that there is no significant difference in the changes of water retention inside and outside the nature reserves.

图5 秦岭区域国家级自然保护区水源涵养服务保护成效的主要影响因子。%IncMSE越大表示影响效果越大。
Fig. 5 The main factors influencing the conservation effectiveness of national nature reserves in ensuring water retention in Qinling Mountains. The greater the %IncMSE is, the more important the factor is.

保护区内外存在显著性差异($P < 0.05$), 且保护区内水源涵养量减少的程度比保护区外低(表2)。倾向评分分配比后的配对样本分析结果显示, 在19个国家级自然保护区中有17个保护区水源涵养量变化率在保护区内外存在显著性差异($P < 0.05$), 仅有陕西摩天岭与河南小秦岭2个自然保护区例外($P > 0.05$)。在17个存在显著性差异的国家级自然保护区中, 与保护区外的配对样本相比, 12个保护区水源涵养量减少程度低于自然保护区外($P < 0.05$), 占保护区总数的63.16%; 而5个国家级自然保护区水源涵养量减少程度高于自然保护区外($P < 0.05$), 占保护区总数的26.32% (表2)。

根据自然保护区水源涵养保护成效(μ)结果显示, 周至国家级自然保护区对水源涵养服务保护效果最好, 其次是汉中朱鹮、观音山、天华山, 保护效果较差的是伏牛山与南阳恐龙蛋化石群国家级自然保护区(图4)。

3.3 国家级自然保护区水源涵养服务保护成效的影响因素

基于Spearman相关分析结果表明, 自然保护区水源涵养服务保护成效与保护区内总降水量变化之间的相关性最强($P < 0.01$), 与保护区内资金投入也呈显著正相关($P < 0.05$); 但与保护区的平均高程等自然因素关系不显著($P > 0.05$), 与单位面积工作人员数量、单位面积巡护人员数量、保护区建立时长、路网密度、保护区形状指数等管理因素关系也不显著($P > 0.05$) (表3)。

表3 秦岭19处自然保护区水源涵养保护成效与影响因素的Spearman相关性分析

Table 3 Spearman correlation coefficients between the influencing factors and the conservation effectiveness of water retention in 19 nature reserves in Qinling Mountains

影响因素 Influencing factor	Spearman相关系数 Spearman correlation coefficient	P
降水变化率 Precipitation change rate	0.926	0.000**
平均高程 Average elevation	0.235	0.363
形状指数 Landscape shape index	-0.260	0.314
资金投入 Funding investment	0.542	0.025*
路网密度 Road density	0.047	0.859
单位面积工作人员数量 Number of staff per km ²	-0.056	0.83
单位面积巡护人员数量 Number of patrolling personnel per km ²	-0.105	0.687
保护区建立时长 Period from the establishment of nature reserves	-0.205	0.430

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

基于随机森林回归模型的分析表明, 路网密度、单位面积工作人员数量、单位面积巡护人员数量、保护区建立时长4个因素在回归模型中为负值, 表明这4种因素对自然保护区水源涵养服务保护成效影响程度较低。在剔除上述4个因素之后, 随机森林回归模型解释率为58.42%, 结果显示, 保护区水源涵养服务保护成效主要受自然因素影响, 其中影响最大的是降水变化率, 其次是平均高程, 而管理因素也有一定影响, 其中资金投入的大小对保护效果影响最大, 其次是保护区形状指数(图5)。

4 讨论

本研究基于倾向评分分配比法和随机森林回归模型构建了自然保护区水源涵养服务保护成效及其影响因素的评估方法, 并针对秦岭区域19处国家级自然保护区对水源涵养服务的保护成效进行了量化评估。首先根据InVEST模型计算了秦岭区域2010–2015年水源涵养量, 并以商洛市为例, 与陕西省水资源公报数据进行了对比, 总体结果较为准确。本研究与采用InVEST模型结合地形指数、流速系数等参数计算水源涵养量(陈姗姗等, 2016; 范亚宁等, 2017)或采用水量平衡法计算水源涵养量(卓静等, 2015)的类似研究结论相近。总体来看, 秦岭区域水源涵养服务呈现出山区高而北部、东南部城市区域低, 以及南坡高、北坡低的趋势, 且整个秦

岭区域2015年水源涵养服务相对于2010年有所降低。

本文采用了倾向评分配比的方法对自然保护区内外2010–2015年水源涵养量变化率进行了对比分析,避免了环境变量等因素的协同影响,较一般直接进行自然保护区内外对比的方法更加准确(Joppa & Pfaff, 2011)。本研究发现,虽然2010–2015年秦岭区域水源涵养量减少较为明显,但保护区总体对水源涵养量的减少起到了减缓作用,这与于博威等(2016)在海南岛自然保护区土壤保持功能的变化分析结论相似。其原因可能是自然保护区内的生态系统较保护区外往往更加完整,提供的生态系统服务更加稳定(Kandziora et al, 2013)。在单个保护区尺度上,基于倾向评分配比的配对样本分析结果表明,大部分保护区(63.16%)体现了较好的水源涵养保护成效,但也有部分保护区不显著,甚至一些保护区内的水源涵养量变化率不如保护区外。其原因可能是不同保护区之间的自然因素存在差异,同时,保护区的管理强度也不一致(Amin et al, 2019; Pearson & Dare, 2019)。

研究表明,秦岭区域自然保护区水源涵养保护成效主要取决于保护区的自然因素,其中影响最大的是降水变化率,这与水源涵养服务主要受降水等气候变化因素影响的研究结论一致(Su & Fu, 2013; Xiao & Ouyang, 2019)。考虑到森林生态系统的面积和结构不同会对降水的分配、拦截和贮存等生态过程产生不同影响,保护区内较为完整的林冠层、灌草层与枯枝落叶层的截留作用延缓了降水形成径流的时间,使森林水文效应产生时滞,从而使得保护区在降水减少的年份对水源涵养服务的减少起到了减缓效果(杨新华和郭荣发, 2002; 王尧等, 2018)。此外,本研究还发现保护区的平均高程也对水源涵养服务的保护成效起着较为显著的作用,海拔高的保护区其自然生态系统往往相对较好,受到的干扰也相对较少(Wang et al, 2013),这与海拔高的保护区对生物多样性保护成效更好的结论相似(Hansen & Rotella, 2002)。

除了自然因素对水源涵养服务保护成效起主导作用以外,人类对保护区的管理因素也有一定的作用。在一定程度上可以通过管理人为可控制的因素来减缓自然因素的影响。例如,周至国家级自然保护区水源涵养服务的保护成效最好,原因一方面

是保护区内自然环境变化较小,且生态系统较为完整与稳定;另一方面,保护区管理机制健全、队伍结构合理、技术力量较强、行政执法机构完善、对保护区内生态系统管理的力度大,因而生态系统受外界干扰相对较小(陈凯华和张孝远, 2006);而南阳恐龙蛋化石群国家级自然保护区由于其主要保护对象为古遗迹化石,对生态系统状况关注较少、管理强度弱、保护区内生态系统结构和功能有所退化,一定程度上导致保护区内的水源涵养服务保护成效较差。本研究还发现资金投入与水源涵养保护成效呈显著正相关,且较其他因素具有更重要的影响(表3, 图5)。其原因可能是,保护区资金投入的多少间接反映了生态系统管理力度的大小(Ian et al, 2012; Lehrer et al, 2019; Machado et al, 2020),这也与类似研究结论相近(Burgess et al, 2007)。建议在未来保护区的发展中,进一步增加保护区的资金投入,同时可以考虑与社会公益组织开展合作,争取更多的运行资金。在其他人为影响因素中,例如旅游、砍伐、放牧等人为干扰活动也对自然保护区生态系统有直接影响(柳江华等, 2007),但旅游、砍伐等数据在时间延续上难以获取与量化,本文没有进行着重介绍,在未来研究中可以考虑。此外,在未来研究中可以增加自然保护区对其他类型生态系统服务的保护成效评估,为自然保护区发展与科学管理提供参考。

参考文献

- Amin A, Choumert-Nkolo J, Combes JL, Combes Motel P, Kéré EN, Ongono-Olinga JG, Schwartz S (2019) Neighborhood effects in the Brazilian Amazônia: Protected areas and deforestation. *Journal of Environmental Economics and Management*, 93, 272–288.
- Austin PC, Mamdani MM (2006) A comparison of propensity score methods: A case study estimating the effectiveness of post-AMI statin use. *Statistics in Medicine*, 25, 2084–2106.
- Bao YB, Li T, Liu H, Ma T, Wang HX, Liu K, Shen X, Liu XH (2016) Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model. *Geographical Research*, 35, 664–676. (in Chinese with English abstract) [包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩 (2016) 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*, 35, 664–676.]
- Bridgewater P, Babin D (2017) UNESCO-MAB Biosphere Reserves already deal with ecosystem services and sustainable development. *Proceedings of the National*

- Academy of Sciences, USA, 114, E4318.
- Briggs J (2016) Global biodiversity loss: Exaggerated versus realistic estimates. *Environmental Skeptics and Critics*, 5(2), 20–27.
- Burgess ND, Butynski TM, Cordeiro NJ, Daggart NH, Fjeldså J, Howell KM, Kilahama FB, Loader SP, Lovett JC, Mbilinyi B, Menegon M, Moyer DC, Nashanda E, Perkin A, Rovero F, Stanley WT, Stuart SN (2007) The biological importance of the Eastern Arc Mountains of Tanzania and Kenya. *Biological Conservation*, 134, 209–231.
- Chen HG, Pan XF, Huang YY, He BC, Chen F, Pan A (2017) Propensity score matching method and its implementation in Stata software. *Chinese Journal of Health Statistics*, 34, 987–990. (in Chinese) [陈亨贵, 潘雄飞, 黄媛媛, 何保昌, 陈法, 潘安 (2017) 倾向评分分配比法及其在Stata软件实现. *中国卫生统计*, 34, 987–990.]
- Chen KH, Zhang XY (2006) Research on system of comprehensive evaluation of Zhouzhi National-level Nature Reserve. *Resource Development & Market*, 22(2), 118–120. (in Chinese with English abstract) [陈凯华, 张孝远 (2006) 周至国家级自然保护区综合评价体系研究. *资源开发与市场*, 22(2), 118–120.]
- Chen SS, Liu K, Bao YB, Chen H (2016) Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City. *Scientia Geographica Sinica*, 36, 1546–1554. (in Chinese with English abstract) [陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 陈海 (2016) 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. *地理科学*, 36, 1546–1554.]
- Chiu M, Rezai MR, MacLagan LC, Austin PC, Shah BR, Redelmeier DA, Tu JV (2016) Moving to a highly walkable neighborhood and incidence of hypertension: A propensity-score matched cohort study. *Environmental Health Perspectives*, 124, 754–760.
- Dudley N (2008) Guidelines for Applying Protected Area Management Categories. IUCN, Gland, Switzerland.
- Fan YN, Liu K, Chen SS, Yuan JG (2017) Spatial pattern analysis on water conservative functionality of land ecosystem in northern slope of Qinling Mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 37(2), 50–56. (in Chinese with English abstract) [范亚宁, 刘康, 陈姗姗, 袁家根 (2017) 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的空间格局. *水土保持通报*, 37(2), 50–56.]
- Finlayson M, Cruz R, Davidson N, Alder J, Cork S, Groot RS, Lévêque C, Milton GR, Peterson G, Pritchard D (2005) Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Gong J, Yan LL, Xu CX, Guo QH (2020) A comparative review of research highlights on ecosystem services of China and USA in the past 30 years. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 3537–3547. (in Chinese with English abstract) [巩杰, 燕玲玲, 徐彩仙, 郭青海 (2020) 近30年来中美生态系统服务研究热点对比分析. *生态学报*, 40, 3537–3547.]
- Grömping U (2009) Variable importance assessment in regression: Linear regression versus random forest. *The American Statistician*, 63, 308–319.
- Hansen AJ, Rotella JJ (2002) Biophysical factors, land use, and species viability in and around nature reserves. *Conservation Biology*, 16, 1112–1122.
- Huang CH, Yang J, Zhang WJ (2013) Development of ecosystem services evaluation models: Research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 3360–3367. (in Chinese with English abstract) [黄从红, 杨军, 张文娟 (2013) 生态系统服务功能评估模型研究进展. *生态学杂志*, 32, 3360–3367.]
- Ian G, Richard G, Sharif J, Maaik M, Ian M, Gill B, Pierre C, Nina M, John W, Naamal S, Tesfay W, Matt F, Neil B, Nigel V (2012) Eastern Afromontane Biodiversity Hotspot. Birdlife International, Nairobi, Kenya.
- Ingram JC, Redford KH, Watson JEM (2012) Applying ecosystem services approaches for biodiversity conservation: Benefits and challenges. *Sapiens*, 5, 1–10.
- Jin L (2008) Evaluation of Ecosystem Services of Xilingol Grassland Nature Reserve. PhD dissertation, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot. (in Chinese with English abstract) [金良 (2008) 锡林郭勒草原自然保护区生态系统服务功能价值评估研究. 博士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特.]
- Jin X (2015) Valuation of Ecosystem Services of Hongxing Wetland National Nature Reserve in Heilongjiang Province. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. (in Chinese with English abstract) [金辛 (2015) 黑龙江红星湿地国家级自然保护区生态系统服务功能价值评估. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Joppa LN, Pfaff A (2011) Global protected area impacts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278, 1633–1638.
- Kandziora M, Burkhard B, Müller F (2013) Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators—A theoretical matrix exercise. *Ecological Indicators*, 28, 54–78.
- Lehrer D, Becker N, Bar P (2019) The drivers behind nature conservation cost. *Land Use Policy*, 89, 104222.
- Li B, Zhang JT (2010) Patch shape indices and scale fractal analysis of steppe landscape in the Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 18(2), 141–147. (in Chinese with English abstract) [李斌, 张金屯 (2010) 黄土高原草原景观斑块形状的指数和分形分析. *草地学报*, 18(2), 141–147.]
- Li JS, Jin YC, Wang W, Zhao ZP, Wu XP (2016) Conservation of Terrestrial Biodiversity in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [李俊生, 靳勇超, 王伟, 赵志平, 吴晓甫 (2016) 中国陆域生物多样性保护优先区域. 科学出版社, 北京.]
- Li SC, Zhang H, Zhou XW, Yu HB, Li WJ (2020) Enhancing protected areas for biodiversity and ecosystem services in the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecosystem Services*, 43, 101090.

- Liao KH, Xu SH, Wu JC, Shi XQ (2012) Uncertainty analysis for spatial prediction of soil saturated hydraulic conductivity. *Advances in Water Science*, 23, 200–205. (in Chinese with English abstract) [廖凯华, 徐绍辉, 吴吉春, 施小清 (2012) 土壤饱和导水率空间预测的不确定性分析. *水科学进展*, 23, 200–205.]
- Liu JH, Zhang H, Zhao AQ (2007) Preliminary research on sustainable development of Taibai Mountain National Nature Reserve. *Forest Resources Management*, (2), 15–19. (in Chinese with English abstract) [柳江华, 张海, 赵爱青 (2007) 太白山国家级自然保护区可持续发展初步研究. *林业资源管理*, (2), 15–19.]
- Liu JL, Ma XY, Zhang ZH, Zhao WS (2013) Multi-scale prediction model and transformation relation of soil saturated hydraulic conductivity. *Advances in Water Science*, 24, 568–573. (in Chinese with English abstract) [刘继龙, 马孝义, 张振华, 赵伟森 (2013) 土壤饱和导水率的多尺度预测模型与转换关系. *水科学进展*, 24, 568–573.]
- Liu ZQ (1983) The distribution of soil zones in Shaanxi. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 11, 131–137. (in Chinese with English abstract) [刘兆谦 (1983) 陕西土壤地带性分布规律. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 11, 131–137.]
- Machado M, Young CEF, Clauzet M (2020) Environmental funds to support protected areas: Lessons from Brazilian experiences. *Parks*, 26, 47–62.
- Miao JQ, Sun S, Wang ZQ, Huang GQ (2017) Evaluating the ecosystem services of Gaotianyan Nature Reserve in Lianhua County, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 6422–6430. (in Chinese with English abstract) [缪建群, 孙松, 王志强, 黄国勤 (2017) 江西高天岩自然保护区生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 37, 6422–6430.]
- Ning YZ, Zhang FP, Feng Q, Wei YF, Ding JB, Zhang Y (2020) Temporal and spatial variation of water conservation function in Qinling Mountain and its influencing factors. *Chinese Journal of Ecology*, 39, 3080–3091. (in Chinese with English abstract) [宁亚洲, 张福平, 冯起, 魏永芬, 丁家宝, 张元 (2020) 秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素. *生态学杂志*, 39, 3080–3091.]
- Pearson LJ, Dare M (2019) Framing up the “stretching” of co-management. *Society & Natural Resources*, 32, 363–381.
- Rosenbaum PR (1989) Optimal matching for observational studies. *Journal of the American Statistical Association*, 84, 1024–1032.
- Schirpke U, de Marino D, Marucci A, Palmieri M, Scolozzi R (2017) Operationalising ecosystem services for effective management of protected areas: Experiences and challenges. *Ecosystem Services*, 28, 105–114.
- Shangguan W, Dai YJ (2013) A China Dataset of Soil Properties for Land Surface Modeling. National Tibetan Plateau Data Center, Lhasa. (in Chinese) [上官微, 戴永久 (2013) 面向陆面模拟的中国土壤数据集. 国家青藏高原科学数据中心, 拉萨.]
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, Guerry AD, Wood SA, Chapin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim CK, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Gowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl AL, Rogers L, Bierbower W (2015) InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, Palo Alto, California.
- Su CH, Fu BJ (2013) Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, 101, 119–128.
- Tang Y, Zhu WP, Zhang H, Song Y (2015) A review on principle and application of the InVEST model. *Ecological Science*, 34, 204–208. (in Chinese with English abstract) [唐尧, 祝伟平, 张慧, 宋瑜 (2015) InVEST模型原理及其应用研究进展. *生态科学*, 34, 204–208.]
- Vereecken H, Diels J, van Orshoven J, Feyen J, Bouma J (1992) Functional evaluation of pedotransfer functions for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1371–1378.
- Wang W, Pechacek P, Zhang MX, Xiao NW, Zhu JG, Li JS (2013) Effectiveness of nature reserve system for conserving Tropical Forests: A statistical evaluation of Hainan Island, China. *PLoS ONE*, 8, e57561.
- Wang Y, Xu P, Fu B, Wang W, Wang HW (2018) Water conservation function assessment models of forest ecosystem: A review. *Ecological Economy*, 34, 158–164, 169. (in Chinese with English abstract) [王尧, 徐佩, 傅斌, 王威, 王海雯 (2018) 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展. *生态经济*, 34, 158–164, 169.]
- Wu N, Chen N, Wang ZG (2019) Evaluating conservation effectiveness of ecological protected areas in Anhui Province based on ecosystem services value. *Journal of Anhui Agricultural University*, 46, 75–82. (in Chinese with English abstract) [吴楠, 陈凝, 王在高 (2019) 基于生态系统服务价值的安徽省生态保护区保护成效评估. *安徽农业大学学报*, 46, 75–82.]
- Xiao Y, Ouyang ZY (2019) Spatial-temporal patterns and driving forces of water retention service in China. *Chinese Geographical Science*, 29, 100–111.
- Xu WH, Xiao Y, Zhang JJ, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu JG, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi XW, Rao EM, Lu F, Wang XK, Daily GC, Ouyang ZY (2017) Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 114, 1601–1606.
- Yang XH, Guo RF (2002) Study on the relationship between precipitation and forest ecosystem. *Forestry Science &*

- Technology, 27(6), 11–15. (in Chinese with English abstract) [杨新华, 郭荣发 (2002) 论森林生态系统与降水的关系. 林业科技, 27(6), 11–15.]
- You SC, Di SC, Yuan Y (2009) Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau Region. *Journal of Natural Resources*, 24, 545–552. (in Chinese with English abstract) [游松财, 邸苏闯, 袁晔 (2009) 黄土高原地区土壤田间持水量的计算. 自然资源学报, 24, 545–552.]
- Yu BW, Rao EM, Chao XL, Shi JK, Zhang CP, Xu WH, Xiao Y, Ouyang ZY (2016) Evaluating the effectiveness of nature reserves in soil conservation on Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 3694–3702. (in Chinese with English abstract) [于博威, 饶恩明, 晁雪林, 史建康, 张翠萍, 徐卫华, 肖赓, 欧阳志云 (2016) 海南岛自然保护区对土壤保持服务功能的保护效果. 生态学报, 36, 3694–3702.]
- Yu FZ, Zhang ZQ, Chen LQ, Shen ZP, You HM (2014) Study on water conservation function of different forestlands in Lushan Nature Reserve, Jiangxi Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 21, 255–259. (in Chinese with English abstract) [于法展, 张忠启, 陈龙乾, 沈正平, 尤海梅 (2014) 江西庐山自然保护区不同林地水源涵养功能研究. 水土保持研究, 21, 255–259.]
- Zhang L, Li CJ, Xia JL, Wang YJ, Wang L, Jiang ZW (2012) Study on propensity score interval matching in non-randomization controlled trials. *Chinese Journal of Health Statistics*, 29(1), 53–57. (in Chinese with English abstract) [张亮, 李婵娟, 夏结来, 王永吉, 王陵, 蒋志伟 (2012) 倾向得分区间匹配法用于非随机对照试验的探索与研究. 中国卫生统计, 29(1), 53–57.]
- Zhao HW, Wu RD, Long YC, Hu JM, Yang FL, Jin T, Wang JJ, Hu PJ, Wu W, Diao YX, Guo Y (2019) Individual-level performance of nature reserves in forest protection and the effects of management level and establishment age. *Biological Conservation*, 233, 23–30.
- Zhuo J, He HJ, Wang J (2015) Assessment of water conservation capacity in Qinling Mountains area. *Journal of Shaanxi Meteorology*, (3), 12–16. (in Chinese) [卓静, 何慧娟, 王娟 (2015) 秦岭地区水源涵养能力评估. 陕西气象, (3), 12–16.]

(责任编辑: 唐志尧 责任编辑: 时意专)