

陕西省生态系统水源涵养功能评估分析

曹叶琳^{1,2,3}, 宋进喜^{1,2,3}, 李明月^{1,2,3}, 王辉源^{1,2,3}

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

摘要:以陕西省为研究对象,基于水量平衡法并结合 GIS 空间分析与线性回归法,对 2000—2014 年区域生态系统水源涵养功能动态变化进行科学评估和重要性评价,并以此为方向探讨区域生态红线规划。结果表明:(1)陕西省水源涵养能力南北高,中间低,空间差异显著,单元水源涵养量为 0~800.90 mm;近 15 年水源涵养功能增加区域面积占研究区总面积的 86.71%,总水源涵养量呈“整体上升,局部下降”特征。(2)气候要素与水源涵养量相关性较强,植被类型也影响着水源涵养的空间特性。植被类型中,森林是生态系统水源涵养的主体,其中,水源涵养能力为:常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林。(3)研究区内水源涵养量<200 mm 的区域占总面积的 65.12%,整体水源涵养生态价值不高;综合划定水源涵养生态保护红线面积约 77 593.31 km²,占总面积的 37.70%,主要分布在秦岭中西部高山区、汉水谷地以南以及延河流域以北,生态系统类型以林地为主。

关键词: 陕西;水源涵养;生态红线;水量平衡;GIS

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0217-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.032

Evaluation of Ecosystem Water Conservation Function of Shaanxi Province

CAO Yelin^{1,2,3}, SONG Jinxi^{1,2,3}, LI Mingyue^{1,2,3}, WANG Huiyuan^{1,2,3}

(1. Institute of Qinling Mountains, Northwest University, Xi'an 710127;

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environment Carrying Capacity, Xi'an 710127;

3. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127)

Abstract: Using water balance method combined with GIS spatial analysis and linear regression method, this paper evaluated the water conservation functions of various ecosystems, basing on which the definition of the ecological protection red line was discussed. Results showed that: (1) Water conservation capacity was higher in the southern Shaanxi, followed by that in the north and central Shaanxi. Annual water conservation per square kilometer fluctuated between 0~800.90 mm, with significant spatial difference. From 2000 to 2014, the total water conservation capacity increased significantly and the area with increasing water conservation rose to 86.71% of the total area, and the total water conservation capacity characterized by “overall rise and partial decline”. (2) Strong relationships were detected among climatic elements and water conservation. Meanwhile, the vegetation types also played certain roles in affecting the spatial patterns of water conservation. Among vegetation types, forest was the major contributor to the water conservation function in this region. The order of water conservation capacity in terms of forest ecosystems was evergreen broad-leaved forest > evergreen coniferous forest > deciduous broad-leaved forest > deciduous coniferous forest. (3) In the study area, the area with unit water conservation less than 200 mm accounts for 65.12% of the total area, indicating insignificant overall water conservation value. The red line areas of water conservation and ecological protection is comprehensively delimited to approximately 77 593.31 km², 37.70% of the total area, which was mainly distributed in the mountainous areas of the central and western Qinling Mountains, southern Hanshui Valley and northern Yanhe River Basin.

Keywords: Shaanxi area; water conservation; ecological red line; water balance; GIS

收稿日期:2019-12-28

资助项目:陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF-045);陕西省水利科技计划项目(2018slkj-12)

第一作者:曹叶琳(1996—),女,在读硕士研究生,主要从事生态水文研究。E-mail: linyecao@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:宋进喜(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事水文学、水资源及水环境研究。E-mail: jinxisong@nwu.edu.cn

生态系统服务功能是生态系统在一些生态过程中,对外部环境所表现的重要作用,维持着人类的生命保障系统^[1-2]。其中,水源涵养作为陆地生态系统的一种重要生态服务,其功能表现形式主要包括调节径流、净化水质、供给淡水等^[2-3],但这些服务功能因受多种因素(气候、植被等)的影响而具有复杂性和动态性^[4]。并且不同陆地生态系统由于群落生物特性与结构的不同,其水源涵养效应也存在较大差异^[5-6]。自水源涵养服务功能量化成为可能^[7],有关水源涵养功能的研究呈指数型增长^[8],初期研究^[9]内容主要集中在森林生态系统和水的相互作用(调节河川径流、拦蓄降水);随着社会的发展和研究的深入,水源涵养的社会经济价值和影响机制受到更多关注^[10-11]。目前,生态系统水源涵养的概念、机制和评估方法的研究还在进一步完善^[12]。其中,关于水源涵养评估方法主要归结为 3 种:生态系统贮存降水的能力^[13]、水量平衡原理对区域水量动态的捕捉^[14-15]以及模型的定量研究^[16]。

陕西省横跨长江和黄河两大流域,省域内包括全国重要水源涵养区秦岭,水土流失和荒漠化较严重区黄土高原以及关中平原城市群,在国家“两屏三带”生态安全战略格局中占有重要地位。在陕西省内有关水源涵养的研究多侧重于局部地区水源涵养空间格局^[16]与植被群落结构的水文生态功能及价值量^[17],对以省域为尺度,结合生态保护战略的生态系统水源涵养能力的研究较少,而陕西省生态系统水源涵养功能时空异质性的研究,对区域水源涵养能力的认知、自然环境和社会可持续发展的促进具有重大意义。本文以陕西省为研究范围,基于水量平衡原理并结合 GIS 空间分析和线性回归法来剖析区域水源涵养时空动态变化,确定水源涵养重要性分级区域,并在此基础上结合生态红线划分原则进行水源涵养功能保护红线初步划定,为区域水资源规划与协调提供参考。

表 1 主要数据来源

数据类型	数据描述
降水数据	2000—2014 年陕西省 99 个气象站点日观测数据空间插值数据单位为 0.1 mm,分辨率 1 km
生态系统数据	陕西省 100 万植被类型空间分布数据,分辨率 1 km
蒸散发	分辨率:1 km;产品波段:H26V05 和 H27V05 年产品时段:2000—2014 年;单位:0.1 mm

2.2 评估方法

2.2.1 水源涵养评估 水源涵养量作为生态系统水源涵养功能的评估指标,与降水量、蒸散发、地表径流和土地覆被类型等密切相关。以整个陕西省为研究区域,生态系统为基本单元,基于水量平衡原理计算水源涵养量^[3]。水量平衡法将生态系统视为 1 个“黑箱”,着眼于水量的输入和输出,输入量为大气降水,输出量为蒸发、蒸腾及各种径流,水量的输入与输出

1 研究区概况

陕西省位于中国内陆,地理位置介于 105°29′—111°15′E,31°42′—39°35′N,东西经度跨度窄,南北纬度跨度较宽,因此南北气候差异明显,从北到南依次跨中温带、暖温带和亚热带。植被分布同样具有地带性,从北到南依次为温带草原、森林草原、暖温带落叶阔叶林和北亚热带常绿阔叶林^[18]。境内主要分为 3 大板块,即陕南秦巴山区、关中平原城市群和陕北黄土高原。降雨季节变化明显,多发生在夏秋季节,主要集中于 7—9 月。雨季、全年雨量和降雨日数均呈南多北少分布,陕西年降水量 600~700 mm,其中陕南的米仓山、大巴山以及秦岭中西部高山地区受地形影响,年降水量高达 1 000 mm 以上^[19]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

水源涵养功能及其重要性评价所需数据主要包括降水、蒸散发和生态系统类型等(表 1)。降水数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的中国降水量空间插值数据集,该数据集基于全国 2 400 多个气象站点日观测数据,应用基于局部薄盘样条理论的 ANUSPLIN 插值软件^[20-22],目前该方法对于气象要素的插值分析是较合理和准确的。生态系统类型数据采用数据集《1:1 000 000 中国植被图集》,该图集详细反映了我国植被类型组、群系和亚群系的分布状况,来源于中国科学院资源环境科学数据中心的 100 万植被类型空间分布数据集。蒸散发数据来源于 MODIS 全球蒸散发产品(MOD16A3)数据(http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products),该数据集是基于 Penman-Monteith 公式的蒸散发算法,包括陆地蒸发和植物蒸腾,是土壤蒸发、湿冠层蒸发和干冠层表面植物蒸腾作用产生的水蒸气通量的总和^[23-24]。该数据通过了全球通量塔的验证,模拟精度达到 86%。

之差即为水源涵养量^[25]。计算公式为:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中: TQ 为总水源涵养量(m^3); P_i 为降雨量(mm); R_i 为地表径流量(mm); ET_i 为蒸散发(mm); A 为 i 类生态系统的面积(km^2); i 为研究区第 i 类生态系统类型; j 为研究区生态系统类型数。

地表径流量 R_i 由降雨量与地表径流系数的乘积得到。地表径流系数说明了降雨量转化为径流量的

程度,能够适当说明生态系统对降雨和径流的影响。

$$R = (P \times \alpha) \quad (2)$$

式中: R 为地表径流量(mm); P 为多年平均降雨量(mm); α 为平均地表径流系数,见表2^[25-26]。

表2 平均地表径流系数

生态系统类型 I	生态系统类型 II	平均地表径流系数/%
森林	常绿阔叶林	4.65
	常绿针叶林	4.52
	落叶阔叶林	2.70
	落叶针叶林	0.88
灌丛	常绿阔叶灌丛	4.26
	落叶阔叶灌丛	4.17
草地	草甸	8.20
	温带草原	3.94
	温性草丛	9.37
园地	热带亚热带草丛	3.87
湿地	乔木和灌木园地	9.57
其他	沼泽和水库	0
	耕地和荒漠	0

以 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 大小的空间单元为计算精度,对 2000—2014 年期间陕西省的降水量、蒸散发以及水源涵养量进行线性回归分析,了解水源涵养能力在区域上的变化趋势及其影响因素。计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{15 \times \sum_{i=1}^{15} i \times \omega_i - \left(\sum_{i=1}^{15} i \right) \left(\sum_{i=1}^{15} \omega_i \right)}{15 \times \sum_{i=1}^{15} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{15} i \right)^2} \quad (3)$$

式中: ω_i 表示每年降水量、年蒸散发量或者年水源涵养量(mm); i 为年变量, $i=1$ 时表示 2000 年降水量、蒸散发量或者水源涵养量, $i=2$ 时表示 2001 年的相对对应因子的量,以此类推至 $i=15$ 时,表示 2014 年相对对应因子的量; slope 为一元线性回归斜率,根据 slope 值的正负可知水源涵养量是增加还是减少,值的大小则决定增加还是减少的速率。

2.2.2 重要性评价及红线划定 水源涵养量的大小是评价水源涵养重要性的关键指标,基于上述计算结果,采用自然间断点分级法与定性分析相结合的方法将研究区水源涵养重要性由高到低分为 5 个等级。此外,根据国家发展改革委环境保护部 2017 年 5 月印发的《生态保护红线划定指南》中关于生态保护红线划定的要求,结合水源涵养重要性评估结果,将陕西省水源涵养依次划为弱、一般、中等、重要、极重要 5 个等级的生态重要功能区,并与生态水环境敏感区进行叠加合并,形成水源涵养生态保护红线区域。

3 结果与分析

3.1 降雨和蒸散特征分析

陕西省位于西北内陆,400 mm 等降水量经过其

西北边界,南部秦岭山脉与 800 mm 等降水量线重合,其降雨量由南到北逐渐减少;区域内虽仅有北部极少区域属于半干旱地区,但整体陆地蒸散发较强,其中南部地区植被覆盖度较高,植物蒸腾作用显著,因而成为蒸散发高值区;在降水充沛区域,加上气候温暖湿润,陆地蒸散发也较高。由图 1 可知,2000—2014 年降雨量在 2003 年和 2011 年出现 2 个较明显的高峰,整体呈缓慢增长趋势;陆地蒸散在 2003 年和 2012 年出现峰值,总体较稳定,增加趋势不明显。降雨量和陆地蒸散最小值、最大值和均值分别为 602.24 mm(2001 年)、880.25 mm(2003 年)、704.24 mm 与 449.08 mm(2001 年)、534.95 mm(2003 年)和 494.73 mm。

3.2 水源涵养特征分析

3.2.1 水源涵养时空特征 2000—2014 年,研究区水源涵养量空间均值在 $-618.58 \sim 1380.80 \text{ mm}$ 波动,多年平均空间均值范围在 $-351.95 \sim 800.90 \text{ mm}$ (存在负值表明局部地区降雨量小于陆地蒸散,不能涵养水源,故将负值归 0),最高值分布在陕南米仓山地区,最低值分布在关中和延安市南部山区,整体呈现出南部高,北部次之,中部低的特征。此外,根据水量平衡法计算出的水源涵养总量最小值出现在 2004 年,水源涵养总量为 $206.77 \times 10^8 \text{ m}^3$;最大值出现在 2011 年,为 $713.78 \times 10^8 \text{ m}^3$,与该年份较高的降雨量有关;而累年平均水源涵养总量则为 $367.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,总水源涵养量线性增加趋势较为明显(图 1)。

关于水源涵养的气候影响因子主要体现在降雨量和陆地蒸散发量。由图 1 可知,水源涵养量与降水量起伏相一致,高峰出现年份相同,说明水源涵养量与降水量呈正相关;同时可以看出,水源涵养量与蒸散发呈负相关,比如 2004 年降雨量虽然不是最小值,但较高的陆地蒸散发使得该年份水源涵养量最低;2012 年降雨量的突然减少和陆地蒸散的增加造成该年份水源涵养量的急剧下降。而陕北南部山区,尽管降雨量不低,但由于陆地蒸散过高,造成该地区水源涵养量出现低值。总体来说,陕南山区海拔较高,天然植被面积众多,即使陆地蒸散发量很大,但其降水量充足,并且植被对降雨的缓冲与拦蓄作用使得地表径流产生较少,从而蓄积较多水分。因此,在综合作用下水源涵养能力远大于以栽培植被为主的关中平原;陕北地处高原,以草地生态系统为主,植被蒸腾作用不显著,陆地蒸散较少,但因纬度较高,且一部分属于干旱半干旱地区,降水较少,水源涵养能力相对较弱。

3.2.2 不同生态系统的水源涵养空间特性 由于气候、植被和地理位置等因素存在明显的空间差异,水源涵养也有所区别(图 2)。从生态系统类型来看,在所有生态系统中森林和园地(栽培植被)水源涵养量

最高,这与 2 种生态系统类型所占面积较大有关,其水源涵养总量分别为 $93.21 \times 10^8, 115.12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占研究区水源涵养总量的 25.34%, 31.30%; 草地和灌丛的水源涵养总量分别为 $73.13 \times 10^8, 53.61 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占总量的 19.88%, 14.58%。在自然植被中,水源涵养能力由高到低依次为森林、灌丛和草地,分别为 $21.51 \times 10^4, 21.87 \times 10^4, 18.68 \times 10^4 \text{ m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其中森林和灌丛群落密闭性较好,有利于截留降水,涵养水源,但森林群落层次丰富,截留的降

水大部分都被蒸发,蒸腾作用远大于灌丛,因此灌丛的水源涵养能力略高于森林,而草地对降雨的截留较弱,容易形成径流,从而减少水源涵养。综合可知,森林生态系统的水源涵养作用最为显著,在森林生态系统中,落叶阔叶林水源涵养总量最高,其次为常绿针叶林,但从涵养能力来看则是常绿针叶林强于落叶阔叶林;而常绿阔叶林水源涵养能力最高,落叶针叶林涵养能力最小(图 2)。由此可见,不同生态系统类型对水源涵养差异性的影响。

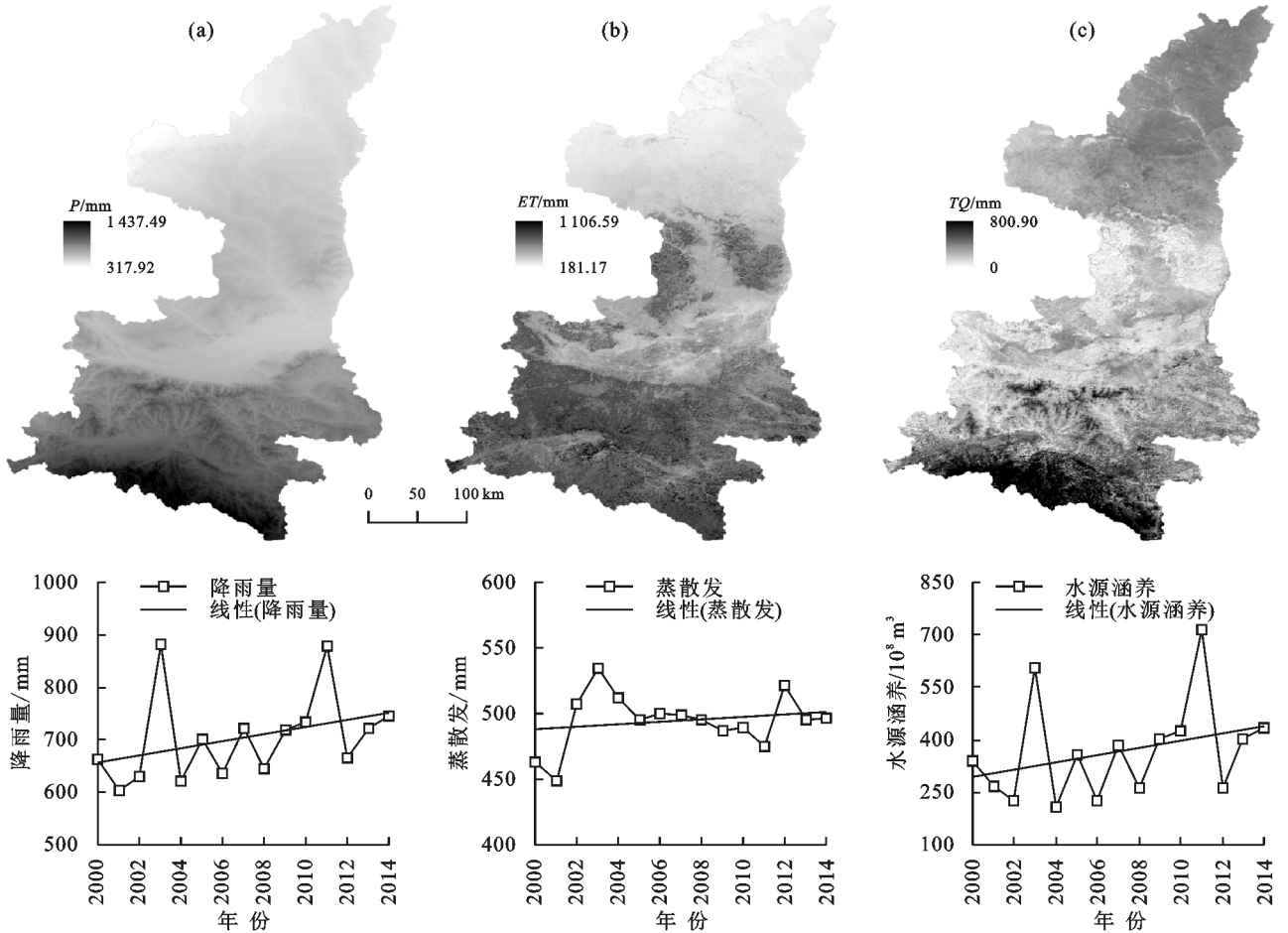


图 1 2000—2014 年陕西省降水量 P、蒸散量 ET 和水源涵养 TQ 时空特征

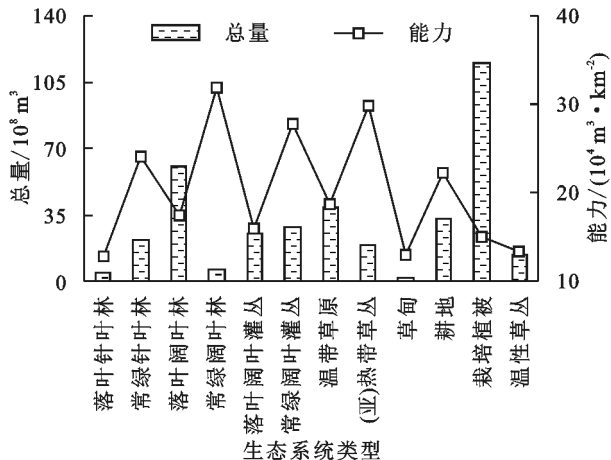


图 2 陕西省水源涵养空间特性

3.2.3 水源涵养变化规律 2000—2014 年陕西省水

源涵养量整体表现出增加趋势(图 3c),增加区域分布广泛,面积占研究区总面积的 86.71%;减少区域面积占比为 13.29%,说明自 1990 年以来,陕西省实施的一系列重点生态建设工程取得成效,使生态环境有了明显好转,譬如陕北退耕还林还草以及水土保持工程的建设,将一些耕地、荒漠和未利用地等转变为林地或草地;秦巴山区封山育林和天然防护林保护工程对国家生态安全屏障的保护与修复。陕西省水源涵养量的变化主要是土地覆被和降水的影响,但由于本研究在评估涵养水量时所采用的是固定年份的植被类型,因此水源涵养量的变化主要受降水的影响。由图 3 可知,水源涵养量增加趋势较大区域(>5%)与降雨量变化空间分布较为相似,这说明降水量的增

减关系着水源涵养量的变化,位于汉中西南部的嘉陵江流域和大巴山西部地区降水增加趋势最为明显(>15%),与该范围内水源涵养增加趋势一致。此外,在宝鸡市千河流域中上游区域蒸散发增加趋势较

大(>5%),与该区域水源涵养减弱趋势一致;而在安康市中东部汉江流域和商洛最东部商南县地区,降水呈减少趋势,蒸散发减少趋势不明显,使得该区域水源涵养减少趋势较为突出。

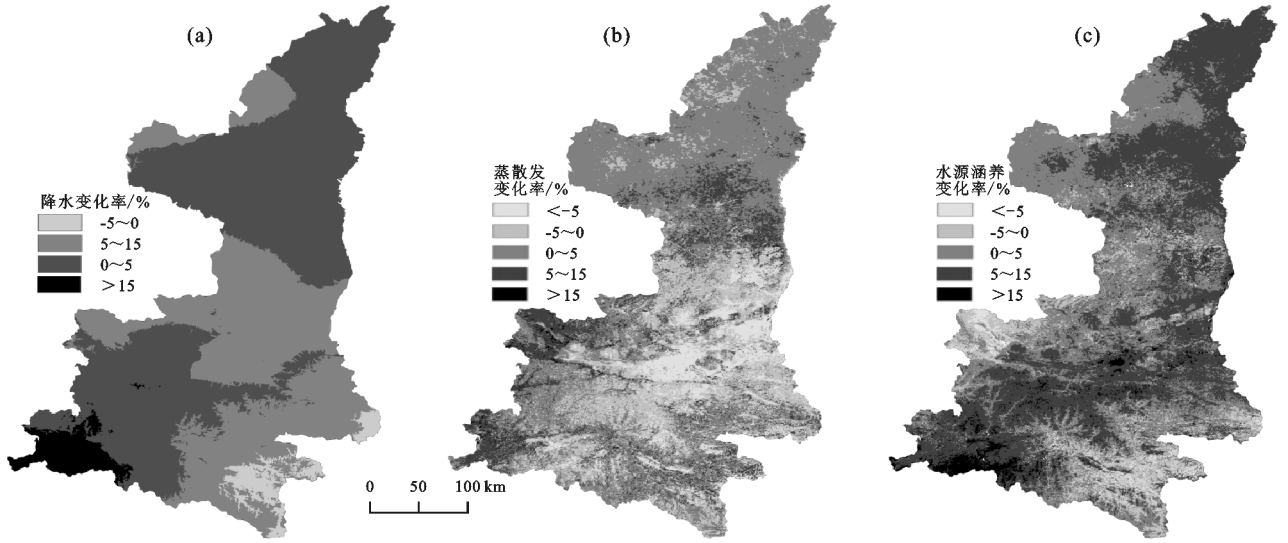


图 3 2000—2014 年陕西省水源涵养及其影响因子变化率

3.3 水源涵养重要性评价

基于 2000—2014 年陕西省水源涵养均值空间分布特征,将研究区水源涵养重要性分为弱(<100 mm)、一般(100~200 mm)、中等(200~300 mm)、

重要(300~500 mm)和极重要(>500 mm)5 个等级。从表 3 可以看出,依据分级标准,进行空间分析,得到近 15 年不同水源涵养功能区的面积及比例结果。

表 3 陕西省水源涵养功能评价分级

评价 分级	水源涵养量 标准/mm	水源涵养 分级	水源涵养量/ (10 ⁸ m ³)	水源涵养 占比/%	面积/ km ²	面积 占比/%
I 级	<100	弱	28.02	7.62	48318	23.48
II 级	100~200	一般	130.40	35.46	85694	41.64
III 级	200~300	中等	112.80	30.67	48807	23.71
IV 级	300~500	重要	69.96	19.02	18211	8.85
V 级	>500	极重要	26.62	7.24	4790	2.33

对每年水源涵养功能重要性进行统计,2000—2014 年期间水源涵养重要性不同等级面积占比波动较大(图 4)。波动最明显的当属水源涵养较弱区域,最大值出现在 2004 年,占总面积百分比为 61.12%,说明该年份超过半数的区域水源涵养量均在 100 mm 以下,结合上文知 2004 年水源涵养总量最低;最小值出现在 2011 年,仅占 3.72%,而中等区、重要区和极重要区均为最大,三者所占比例总和为 79.67%,说明该年份有将近 4/5 的区域水源涵养量在 200 mm 以上,属水源涵养生态功能最高年份。整体来看,2000—2014 年期间水源涵养较弱区面积的减少趋势和其他等级区面积的增加趋势反映了总水源涵养量的增减。

变化较小。2010—2014 年变化显著,除较弱和一般区域以外等级面积均高于整个研究时段的比例,空间上表现出从南北向中部扩展,整体以增加为主。总体来看,2000—2014 年极重要区主要分布在陕南米仓山和大巴山地区;重要区主要分布在汉水谷地以及秦岭部分区域;中等区集中分布在无定河流域及其以北,秦岭地区分布较分散;一般区分布最为分散且面积最广,秦岭和汉中盆地分布分散,白于山和延河流域分布较为集中;水源涵养较弱区主要分布在黄龙山、葫芦河流域以及汉中盆地。其中,陕西省水源涵养一般和较弱区域面积将近占总面积的 2/3,说明研究区内仅少数区域水源涵养量高于 200 mm,整体水源涵养生态功能价值较低。

图 5 为研究区水源涵养重要性不同时间段的空间分布。2000—2004 年陕西省水源涵养空间均值量整体偏低,与整个研究时间段相比较弱区域和一般区域面积偏多 9.59%。相比之下,2005—2009 年整体

3.4 水源涵养功能生态保护红线

生态保护红线是指对具有特殊生态功能的区域所划定的保护线^[27]。本文基于以上水源涵养量的计算结果和水源涵养重要性评价,结合生态保护红线划

定原则,将水源涵养量在 200 mm 以上的区域划定为水源涵养生态保护红线区(图 6);由于涵养水源在一定程度上还指保水蓄水能力,因此考虑到研究区河流、水库等水源地,将研究区 8 条主要河流的 1 km 缓冲区划为河流生态保护红线区;依据全国重要饮用水水源地名录(表 4),将国家重要饮用水水源地保护区(包括一级保护区、二级保护区和准保护区)也纳入水源涵养功能生态保护红线范围。

综合以上得到研究区水源涵养生态红线面积为 71 808 km²,主要分布在渭河以南、延河以北,汉水谷地以南和延河流域以北分布最为集中;面状生态保护红线区域还包括国家重要饮用水水源地保护区,面积约为 4 520.37 km²;带状区域主要指河流生态红线,面积约为 3 868.9 km²。扣除重复计入的红线面积 2 603.96 km²,总水源涵养功能生态保护面积约为 77 593.31 km²,占研究区总面积的 37.70%。红线范

围内的主要生态系统类型以林地为主,其次是草地,且红线南部区域处于南水北调水源涵养地,山多地少,开发程度较低,自然环境相对较好;北部区域生态脆弱,近些年生态保护工程的建设对水源涵养能力的增加发挥较大影响。

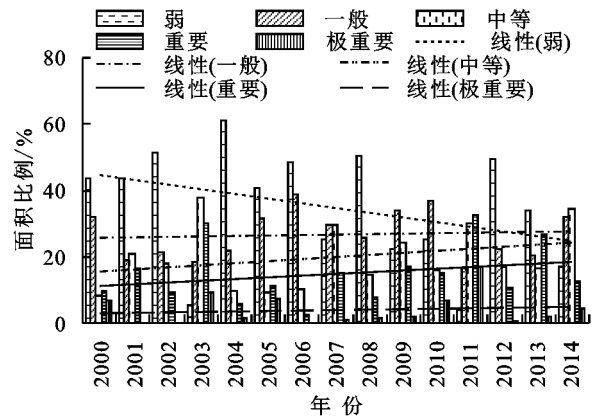


图 4 2000—2014 年陕西省水源涵养量各等级所占面积比例

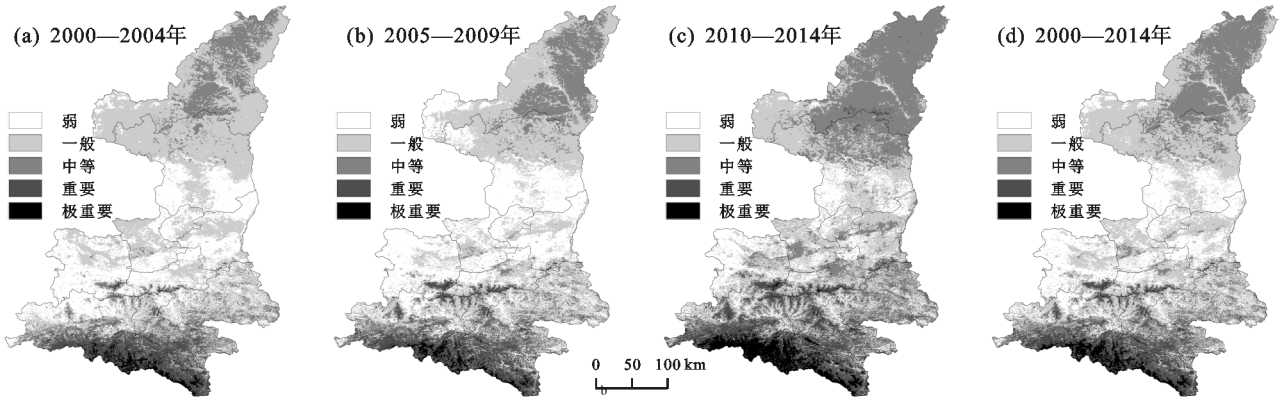


图 5 不同时间段陕西省水源涵养重要性空间变化

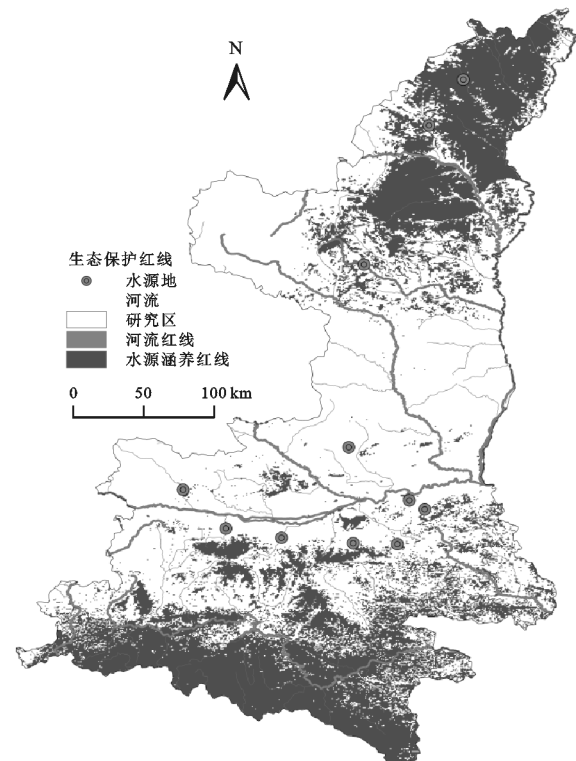


图 6 研究区水源涵养功能生态红线分布

表 4 研究区国家重要饮用水水源地保护区

水源地名称	纬度/(°)	经度/(°)	保护区等级	面积/km ²
黑河金盆水库水源地	34.1	108.2		1480.73
石头水库水源地	34.2	107.6	一级保护区	673.00
李家水库水源地	34.0	109.4	二级保护区	361.64
涧峪水库水源地	34.4	109.7	准保护区	115.30
瑶镇水库水源地	38.8	110.1		896.00
沈水库水源地	34.4	109.5		255.10
桃曲坡水库水源地	35.0	108.9	一级保护区	43.60
王瑶水库水源地	36.9	109.0	二级保护区	189.96
红石峡水库水源地	38.4	110.0		304.57
冯家山水库水源地	34.6	107.2	一级保护区	68.74
石砭峪水库水源地	34.0	108.9		132.00

4 结论

陕西省生态系统水源涵养量整体上呈现出南部高,北部次之,中部较低的特征。2001—2004 年研究区生态系统水源涵养量累年平均值为 367.79×10^8 m³;水源涵养量呈“整体上升,局部下降”特征,下降区主要分布在宝鸡市千河流域中上游、安康市中东部

汉江流域以及商洛最东部商南县,主要受降水的影响。森林生态系统水源涵养作用最为显著,其中,水源涵养总量为落叶阔叶林>常绿针叶林>常绿阔叶林>落叶针叶林,水源涵养能力为常绿阔叶林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林。

2000—2014年研究区水源涵养极重要区和重要区面积累年平均占总面积的11.18%,主要分布在汉水谷地、米仓山和大巴山以及秦岭部分地区;而较弱和一般区占陕西省总面积的65.12%,整体水源涵养价值不高。本研究最终划出的红线范围内,水源涵养能力强,河流和重要饮用水源地保护区众多,是对水源涵养生态功能保护红线划定科学性的一个重要指证。

总体来说,本文对陕西省水源涵养功能生态保护红线划定是一次有益尝试,是在水源涵养功能的基础上,考虑区域的生态价值所划定的保护线,对于区域水资源管理提供一定借鉴。值得说明的是,本文主要讨论的是水源涵养的时空变化与红线范围的划定,由于数据精度的局限,对水源涵养能力的空间异质性还需更深入的研究。

参考文献:

[1] Gunton R M, van Asperen E N, Basden A, et al. Beyond ecosystem services: Valuing the invaluable [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2017, 32(4): 249-257.

[2] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].*地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.

[3] 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.

[4] 靳芳,鲁绍伟,余新晓,等.中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J].*应用生态学报*, 2005, 16(8): 1531-1536.

[5] 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.

[6] 李杨,王百田,饶良懿,等.重庆缙云山典型林分水源涵养功能研究[J].*安徽农业科学*, 2012, 40(3): 1660-1664.

[7] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253.

[8] 陈东立,余新晓,廖邦洪.中国森林生态系统水源涵养功能分析[J].*世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.

[9] 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.

[10] Biao Z, Wen H L, Gao D X, et al. Water conservation

of forest ecosystem in Beijing and its value [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426.

[11] 石小亮,陈珂.吉林省森林涵养水源经济价值核算[J].*水土保持通报*, 2015, 35(5): 169-172, 179.

[12] 崔景轩,李秀芬,郑海峰,等.典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征[J].*生态学报*, 2019, 39(9): 3026-3038.

[13] 侯晓臣,孙伟,李建贵,等.森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J].*干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 121-127.

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

[15] 聂忆黄,龚斌,李忠.青藏高原水源涵养能力时空变化规律[J].*地学前缘*, 2010, 17(1): 373-377.

[16] 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格局[J].*水土保持通报*, 2017, 37(2): 50-56.

[17] 李晶,任志远.陕北黄土高原生态系统涵养水源价值的时空变化[J].*生态学杂志*, 2008, 27(2): 240-244.

[18] 李登科,郭锐.基于植被生长规律的陕西省植被遥感分类[J].*高原气象*, 2008, 27(1): 215-221.

[19] 彭艳,王钊,董妍,等.1960—2012年陕西降水变化特征及可能成因分析[J].*高原气象*, 2016, 35(4): 1050-1059.

[20] 廖顺宝,李泽辉,游松财.气温数据栅格化的方法及其比较[J].*资源科学*, 2003, 25(6): 75-80.

[21] 阎洪.气象时空数据的样条插值与应用[J].*地理与地理信息科学*, 2003, 19(5): 27-31.

[22] 王英,曹明奎,陶波,等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].*地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040.

[23] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.

[24] Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.

[25] 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.

[26] 赵焕胤,朱劲伟,王维华.林带和牧草地径流的研究[J].*水土保持学报*, 1994, 8(2): 56-61.

[27] 李萌,王传胜,张雪飞.国土空间规划中水源涵养功能生态保护红线备选区的识别[J].*地理研究*, 2019, 38(10): 2447-2457.