

DOI: 10.5846/stxb202103040585

杜世勋, 刘海江, 张梦莹, 王亚璐, 刘雪佳, 刘军会. 水源涵养型国家重点生态功能区生态系统服务功能评估. 生态学报, 2022, 42(11): 4349-4361.
Du S X, Liu H J, Zhang M Y, Wang Y L, Liu X J, Liu J H. Assessment of ecosystem services in the national key ecological function areas for water conservation. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4349-4361.

水源涵养型国家重点生态功能区生态系统服务功能评估

杜世勋^{1,*}, 刘海江², 张梦莹¹, 王亚璐¹, 刘雪佳¹, 刘军会³

1 山西省生态环境保护服务中心(山西省环境规划院), 太原 030000

2 中国环境监测总站, 北京 100012

3 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要:为评估“十二五”以来国家重点生态功能区转移支付政策的阶段性实施效果,以水源涵养类型国家重点生态功能区为对象,基于水量平衡法,利用 2011 年和 2019 年土地覆被数据,并结合气象数据,分析了水源涵养型国家重点生态功能区 2011 年和 2019 年水源涵养功能、生态系统面积、生态系统质量状况及其变化情况。研究表明,自 2011 年转移支付政策实施以来: 1) 全国水源涵养型重点生态功能区内的水源涵养能力呈现从西北部到东南部逐渐增加的空间分布趋势,2019 年全国水源涵养型重点生态功能区水源涵养能力较 2011 年显著增加。2) 全国水源涵养型重点生态功能区森林面积有所增加,湿地得到有效恢复。3) 全国水源涵养重点生态功能区生态系统质量提高,平均植被覆盖度有所增加,呈现东北部及中南部高,西北部低的分布趋势。总体来看,转移支付政策的实施对全国水源涵养重点生态功能区森林、草地生态系统水源涵养功能的提升发挥了积极作用,基本上达到了转移支付政策预期的阶段性目标。

关键词:国家重点生态功能区;转移支付;水源涵养;生态系统服务

Assessment of ecosystem services in the national key ecological function areas for water conservation

DU Shixun^{1,*}, LIU Haijiang², ZHANG Mengying¹, WANG Yalu¹, LIU Xuejia¹, LIU Junhui³

1 Shanxi Consulting Service Center for Eco-environmental Protection(Shanxi Academy for Environmental Planning), Taiyuan 030000, China

2 China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

3 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: The transfer payment policy in national key ecological functional areas has been implemented since the “12th Five-Year Plan”, but the effect of this policy on the ecosystem, especially in water conservation type national key ecological function areas, is far from being clearly understood. The objective of this study is to evaluate the phased implementation effect of transfer payment policy in the national key ecological function areas. In this research, water balance method was employed to analyze the water conservation function and its changes in 2011 and 2019. The area and the quality of the ecosystem in 2011 and 2019 were evaluated using land-cover data and meteorological data. The results showed that since the implementation of the transfer payment policy in 2011: (1) the capacity of water conservation in the national key ecological function areas of water conservation presents a spatial distribution trend that gradually increases from the northwest to the southeast. In 2019, the capacity of water conservation in the national key ecological function areas of water conservation

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500205)

收稿日期:2021-03-04; 采用日期:2021-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 120121828@qq.com

increased significantly compared with 2011. (2) The area of forests in key ecological function areas for water conservation has increased, and wetlands has effectively restored in the national key ecological function areas of water conservation from 2011 to 2019. (3) The quality of the ecosystem in the water conservation type national key ecological function areas has improved, and the average vegetation coverage has increased, showing a trend of high distribution in the northeast and south central and low in the northwest from 2011 to 2019. Overall, the implementation of the transfer payment policies, such as natural forest protection, returning farmland to forest, returning grazing land to grass and other projects, have played a positive role in improving the water conservation function of forests and grassland ecosystems in the national key ecological function areas of water conservation. However, we should pay enough attention to a small number of water conservation type national key ecological function areas where water conservation functions have declined, and strengthen ecological protection to avoid the degradation of ecosystem services. Therefore, it is possible to control the disorderly expansion of cities, reduce the area of bare land, increase the area of forest and grassland wetland, and improve the forest structure, there by improve the water conservation function and reflect the benefits of the use of transfer payment funds. For areas where the ecological environment has significantly improved, the central government should give appropriate rewards.

Key Words: national key ecological function areas; financial transfer payment policy; water conservation; ecosystem services

国家重点生态功能区是指承担水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性维护等重要生态功能,关系全国或较大范围区域的生态安全,需要在国土空间开发中限制大规模高强度工业化开发,以保持并提高生态产品供给能力的区域。为维护国家生态安全,推动国家重点生态功能区地方政府加强生态环境保护和改善民生,财政部于 2009 年印发了《国家重点生态功能区转移支付(试点)办法》,中央财政开始以一般性转移支付的方式对国家重点生态功能区县级政府进行生态补偿^[1]。截止到 2019 年,国家已累计下达转移支付资金近 5200 多亿元。目前关于国家重点生态功能区转移支付生态保护效应的理论研究主要是对转移支付政策理解^[2-3]、转移支付方式^[4-5]等进行分析论述,实证研究案例大多集中在单个区域^[6-9],而针对整个水源涵养型国家重点生态功能区的研究,主要是在国家转移支付政策实施前^[10],所以评估国家转移支付政策实施十多年来(2011—2019 年)水源涵养型国家重点功能区的生态保护成效,对国家生态环境保护与修复决策具有重要意义。水源涵养功能区作为国家重点生态功能区四种类型之一,主要分布在我国重要江河源头区和重要水源补给区^[11]。

本研究选择水源涵养型国家重点生态功能区作为研究对象,基于水量平衡法,计算 2011、2019 年水源涵养状况及变化,评估国家重点生态功能区转移支付政策对水源涵养功能区生态保护的效果,以期为促进国家重点生态功能区地方政府生态环境保护提供支撑。

1 研究区概况

目前,纳入国家重点生态功能区转移支付范围的水源涵养类生态功能区有 31 个,涉及 361 个县区,分布在 23 个省份,面积约 207.10 万 km²,约占我国国土面积的 21.88%(图 1、表 1)。

2 研究方法与数据来源

2.1 水源涵养功能评价

(1) 水源涵养量计算

目前,国内外提出了多种定量评估水源涵养能力的方法,如综合蓄水能力法^[12-13]、林冠截留剩余量法^[14]、水量平衡法^[15-16]、降水储量法^[17-18]、多因子回归法^[19]、森林水文模型法^[20]以及多模型集成法^[21-23]等,并且在区域^[24-27]、流域^[28-29]、全国^[30]等多个尺度得到广泛应用。在这些方法中,水量平衡法基于系统整

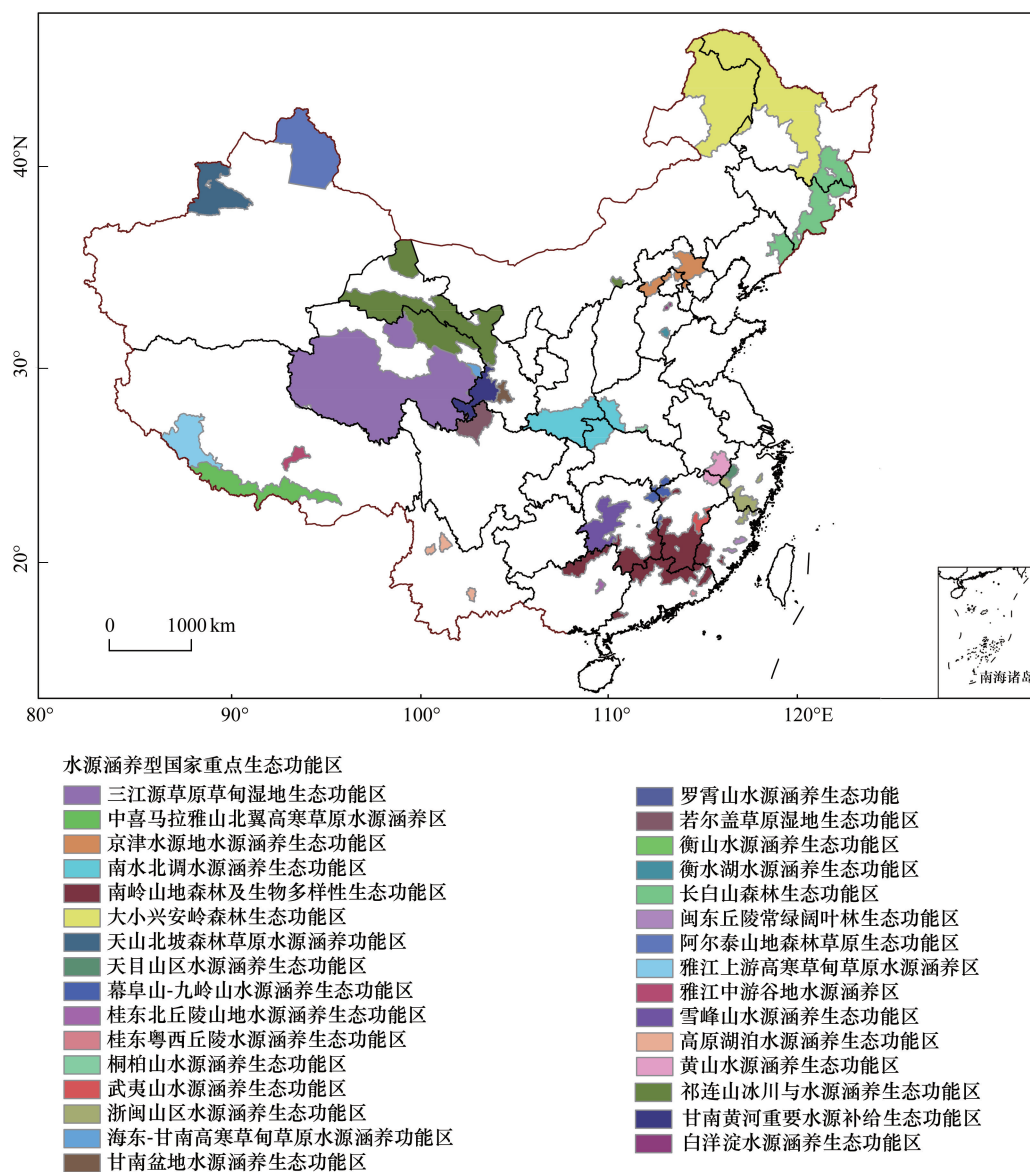


图1 全国水源涵养重点生态功能区

Fig.1 The water conservation type national key ecological function areas

体性原理,只考虑水分输入与输出来核算生态系统持水量,需要降雨量、蒸散量和土地类型数据三个参数即可估算,简单易操作,能够较为准确的计算水源涵养量^[31],已得到广泛应用。因此本文采用水量平衡方程来计算水源涵养量,计算公式为:

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

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_i 为*i*类生态系统面积(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。

2.2 数据来源

(1) 土地覆被数据

2011、2019年的土地覆被数据来源于中国环境监测总站国家生态环境监测网2011、2019年水源涵养功能区生态类型监测数据,该数据基于中高分辨率卫星遥感数据解译获得。本文根据土地利用特点,将土地覆

被类型归并为森林、草地、湿地、耕地、其他和城市 6 个生态系统类型。

表 1 水源涵养类型国家重点生态功能区分布表

Table 1 The distribution table of the water conservation type national key ecological function areas

功能区名称 Function areas name	主要生态系统类型 Main ecosystem types	面积/km ² Area /km ²	涉及县(区、市)个数 Number of counties (districts, cities) involved
南岭山地森林及生物多样性生态功能区 Forest and biodiversity region in Nanling Mountains	森林	161797.33	72
桂东粤西丘陵水源涵养生态功能区 Water conservation ecological function zone in the hills of east Guangxi and West Guangdong	森林	986.46	1
高原湖泊水源涵养生态功能区 Plateau lake water conservation ecological function zone	森林	10444.38	3
桂东北丘陵山地水源涵养生态功能区 Ecological function area of hilly mountain of northeast Guangxi water conservation	森林	2526.95	1
闽东丘陵常绿阔叶林生态功能区 Ecological function area of hilly evergreen broad-leaved forest in eastern Fujian	森林	3681.46	2
雪峰山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Xuefeng Mountains	森林	49813.52	19
武夷山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Wuyi Mountains	森林	8440.53	5
衡山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Hengshan Mountains	森林	177.52	1
罗霄山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Luoxiao Mountains	森林	2018.55	2
浙闽山区水源涵养生态功能区 Water conservation ecological function zone in Zhejiang-Fujian mountainous	森林	22351.99	14
长白山森林生态功能区 Forest region in Changbai Mountains	森林	108803.97	21
幕阜山-九岭山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Mufu Mountains- Jiuling Mountains	森林	12165.16	4
黄山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Huangshan Mountains	森林	20702.30	11
天目山区水源涵养生态功能区 Ecological function area of Tianmu Mountains	森林	4418.03	1
南水北调水源涵养生态功能区 Ecological function area of South-to-North water transfer	森林	110960.70	42
京津水源地水源涵养生态功能区 Water conservation ecological function zone of Beijing and Tianjin water sources	森林	37153.18	16
大小兴安岭森林生态功能区 Forest region in Greater and Lesser Hinggan Mountains	森林	386930.78	47
中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区 Water conservation area of alpine meadow of northern flank of the Central Himalayas	草地	77581.07	11
三江源草原草甸湿地生态功能区 Grassland meadow wetland region in Sanjiangyuan	草地	488349.43	23
雅江上游高寒草甸草原水源涵养区 water conservation area of alpine meadow steppe region on the Yajiang River upstream	草地	55957.16	2
雅江中游谷地水源涵养区 water conservation area In the middle valley of Yajiang River	草地	9785.22	1

续表			
功能区名称 Function areas name	主要生态系统类型 Main ecosystem types	面积/km ² Area /km ²	涉及县(区、市)个数 Number of counties (districts、cities) involved
若尔盖草原湿地生态功能区 Grassland wetland region of Ruorgai	草地	28700.82	3
甘南黄河重要水源补给生态功能区 Important water supply region of theYellow River in Gannan	草地	34961.99	11
海东-甘南高寒草甸草原水源涵养功能区 Water conservation ecological function area of alpine meadow steppe region on Haidong-Gannan	草地	4549.16	2
天山北坡森林草原水源涵养功能区 Ecological function area of forest steppe region on the north slope of tianshan mountain water conservation	草地	68523.16	10
祁连山冰川与水源涵养生态功能区 Glacier and water conservation region in Qilian Mountains	草地	228250.72	20
阿尔泰山地森林草原生态功能区 Mountain forest steppe region in Altai	草地	117549.82	7
桐柏山水源涵养生态功能区 Ecological function area of Tongbai mountain water conservation	耕地	1915.23	1
甘南盆地水源涵养生态功能区 Ecological function area of Gannan basin water conservation	耕地	7825.57	3
衡水湖水源涵养生态功能区 Ecological function area of Hengshui lake	耕地	2411.07	3
白洋淀水源涵养生态功能区 Ecological function area of Baiyangdian	耕地	1260.87	2
合计 Total		2070994.11	361

(2) 气象数据

降水量数据:从中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>)中国地面气候月值数据集中获取全国气象站点 2011 年和 2019 年 20—20 时降水量数据。运用 ArcGIS 10.3 中的克里金插值工具对月降水量数据进行空间插值,插值完成后在栅格计算器中合成年总降水量,精度为 30m。

实际蒸散发:来源于 MODIS 的 MOD16A2 蒸散发数据(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search>),空间分辨率为 1000m,时间分辨率为 8d,运用 MODIS Reprojection Tool 对影像进行拼接、裁剪,之后在 ArcGIS 10.3 中进行 2011、2019 年年值数据的叠加,并重采样为 30m 空间分辨率,最后得到蒸散发因子栅格图。

地表径流数据:地表径流系数依据中国环境监测总站国家生态环境监测网 2011、2019 年全国生态类型监测数据,根据相应的生态系统类型进行折算,其中有林地取常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、落叶阔叶林及落叶针叶林的均值;灌木林地取常绿阔叶灌丛、落叶阔叶灌丛以及针叶灌丛的均值;疏林地直接对应取值;其他林地根据“全国生态遥感监测土地利用/覆盖分类体系”中对地类含义的描述,取稀疏灌丛、乔木园地与灌木园地的均值;高覆盖度草地取值为草原;中覆盖度草地取草甸和草丛的均值;低覆盖度草地取值为稀疏草地;湿地、水田、旱地、建设用地及未利用地直接对应取值。得到表 2 中的地表径流系数均值。

地表径流量由降水量乘以地表径流系数获得,计算公式为:

$$R = P \times \alpha$$

式中, R 为地表径流量(mm), P 为多年平均降水量(mm), α 为平均地表径流系数。各类型生态系统地表径流系数赋值见表 2。

2.3 生态系统质量评价

本研究选取植被覆盖度反映生态系统质量的状况。植被覆盖度信息提取是在对光谱信号进行分析的基础上,通过建立归一化植被指数与植被覆盖度的转换信息,直接提取植被覆盖度信息。

$$C_i = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$

式中, $NDVI_{veg}$ 为完全植被覆盖地表所贡献的信息, $NDVI_{soil}$ 为无植被覆盖地表所贡献的信息。由于大部分植被覆盖类型是不同植被类型的混合体,所以不能采用固定的 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 值,通常根据 NDVI 的频率统计表,计算 NDVI 的频率累积值,累积频率为 5% 的 NDVI 值为 $NDVI_{soil}$,累积频率为 95% 的 NDVI 值为 $NDVI_{veg}$ 。

NDVI 数据采用 MODIS 的 MOD13Q1 NDVI 数据产品 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search>),空间分辨率为 250m,时间分辨率为 16d。

表 2 各类型生态系统地表径流系数均值表

Table 2 Table of mean values of surface runoff coefficients of various types of ecosystems					
生态系统类型 Ecosystem type		平均地表径流系数/% Average surface runoff coefficient	生态系统类型 Ecosystem type		平均地表径流系数/% Average surface runoff coefficient
森林 Forest	有林地	2.038	湿地 Wetland	水域	0
	灌木林	4.2	耕地 Cultivated land	水田	34.7
	疏林地	19.2		旱地	49.69
	其他林地	12.22	其他 Other	未利用地	100
草地 Grassland	高覆盖度草地	4.78	城市 City	城乡、工矿、居民用地	100
	中覆盖度草地	8.785			
	低覆盖度草地	18.27			

3 结果与分析

3.1 水源涵养功能

从空间分布来看,全国水源涵养型重点生态功能区内的水源涵养量呈现从西北部到东南部逐渐增加的趋势,水源涵养量较高的区域主要分布在南岭山地森林及生物多样性生态功能区东部、黄山水源涵养生态功能区西南部、浙闽山区水源涵养生态功能区东部,以森林生态系统类型为主。水源涵养量较低的区域主要分布在西北部的天山北坡森林草原水源涵养功能区、阿尔泰山地森林草原生态功能区以及雅江上游高寒草甸草原水源涵养区,草地是主要的生态系统类型,2011 年和 2019 年水源涵养型生态功能区水源涵养量空间分布情况见图 2。

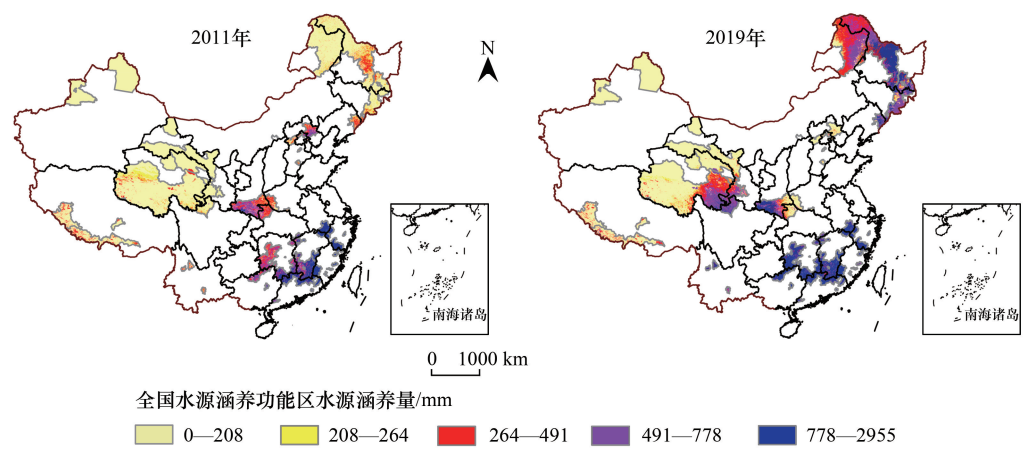


图 2 2011 年和 2019 年全国水源涵养重点生态功能区水源涵养量分布

Fig.2 Distribution of water conservation in the water conservation type national key ecological function areas in 2011 and 2019

分析表明,2011 年全国 31 个水源涵养型生态功能区的水源涵养总量为 3656.59 亿 m^3 ,单位面积水源涵养量为 $0.0018 \times 10^8 m^3/km^2$,2019 年全国 31 个水源涵养型生态功能区的水源涵养总量为 8284.09 亿 m^3 ,单位

面积水源涵养量为 $0.0040 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 2019 年水源涵养总量较 2011 年增长 4627.50 亿 m^3 , 单位面积水源涵养量增加 $0.0022 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 增幅达 120% 以上, 增长主要原因是重点生态功能区内降水量的增长、森林面积的增加以及植被覆盖度的提高, 2011 和 2019 年水源涵养型生态功能区水源涵养量见表 3。水源涵养重点生态功能区内 2011 和 2019 年的平均降水量分别是 602.60mm 和 829.43mm, 增幅为 37.6%, 具体见表 3, 2011 和 2019 年水源涵养型生态功能区降雨量空间分布情况见图 3。研究区内 2011 年平均蒸散发为 334.51mm, 2019 年平均蒸散发为 328.19mm, 稍有减少, 具体见表 3, 降水量的增加和蒸散发的减少直接导致水源涵养量的大幅升高。森林面积 2019 年较 2011 年增长 13110.07 km^2 , 且植被覆盖度有所增加, 森林水源涵养量占到了重点生态功能区水源涵养总量的 70% 以上, 转移支付政策实施以来, 退耕还林、天然林保护等政策的实施, 使得水源涵养重点生态功能区内森林面积增加, 保证了水源涵养功能的稳定提高。

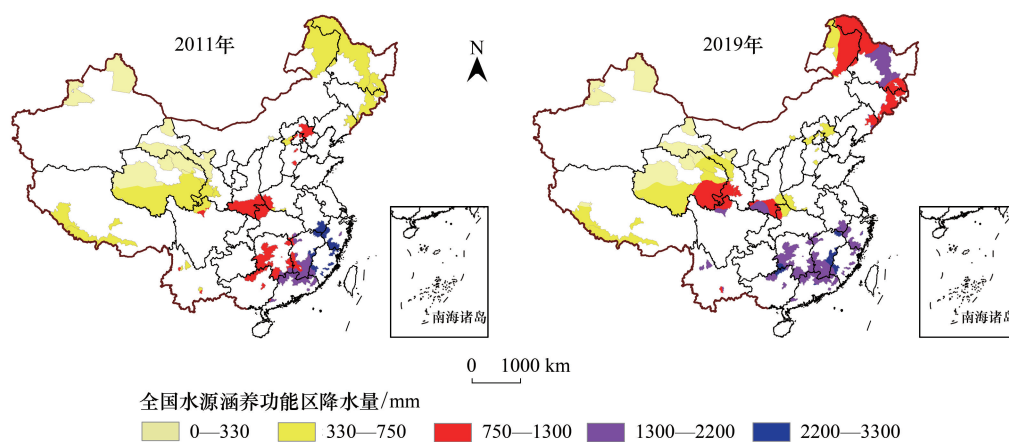


图 3 2011 年和 2019 年全国水源涵养重点生态功能区降水量分布

Fig.3 Distribution of precipitation in the water conservation type national key ecological function areas in 2011 and 2019

从单个功能区水源涵养总量变化来看, 全国 31 个水源涵养型重点生态功能区中, 约 80.65% 的功能区呈现增长趋势, 38.71% 的功能区呈现倍数增长, 仅 9.68% 的功能区的增幅较小, 呈现相对稳定状态。水源涵养量增加多的功能区主要分布在我国东北部以及青藏高原的东北边缘, 其中位于我国东北部的大小兴安岭森林生态功能区和长白山森林生态功能区, 2019 年的降水量均比 2011 年增加一倍以上, 水源涵养量的增加主要得益于降水量的增长。位于青藏高原东北边缘水源涵养量增加明显的 4 个重点生态功能区分别是海东-甘南高寒草甸草原水源涵养功能区、甘南黄河重要水源补给生态功能区、若尔盖草原湿地生态功能区和三江源草原草甸湿地生态功能区, 4 个功能区内林地面积和降水量均有增加, 蒸散发降低, 由于其处于高原气候区, 水分收入是影响该区生态系统结构和功能的主要因素, 所以水源涵养量增长明显。水源涵养量降低的功能区主要是京津水源地水源涵养生态功能区和闽东丘陵常绿阔叶林生态功能区。2019 年较 2011 年京津水源地水源涵养生态功能区林地面积增长 25.41%, 但降水量 2019 年较 2011 年下降幅度大, 降幅达 57%, 直接影响了功能区内 2019 年的水源涵养功能。闽东丘陵常绿阔叶林生态功能区的森林面积降低, 降幅为 9.44%, 且降雨减少明显, 减幅为 44.53%, 森林面积的降低和降水量的减少导致该区 2019 年水源涵养功能下降。

3.2 生态系统宏观结构变化情况

全国水源涵养型重点生态功能区生态系统类型以森林和草地为主。2011 年全国水源涵养型重点生态功能区森林生态系统面积 735965.68 km^2 , 草地生态系统面积为 666812.47 km^2 , 湿地生态系统面积 63398.08 km^2 , 分别占水源涵养全国重点生态功能区面积的 35.63%、32.28%、3.07%。2019 年全国水源涵养重点生态功能区森林和湿地面积分别增加 13110.07 km^2 和 3202.22 km^2 , 增长幅度分别为 1.78% 和 5.05%, 草地面积有所减少, 减少了 25975.95 km^2 , 减幅为 3.90%。减少的草地中有 48.82% 转换为森林, 主要分布在三江源草原草甸湿地

Table 3 Table of water conservation type national key ecological function areas in 2011 and 2019

功能区名称	2011年 功能区水源 涵养涵养量 Water conservation in functional areas in 2011 /亿 m ³	2019年 功能区水源 涵养涵养量 Water conservation in functional areas in 2019 /亿 m ³	2011— 2019年 水源涵养 水量变化 changes in water conservation areas in 2011—2019 conservation	2011— 2019年 功能区 水源涵养 能力 Water conservation capacity of functional areas in 2011/ (亿 m ³ /km ²)	2019年 功能区 水源涵养 能力 Water conservation capacity of functional areas in 2019/ (亿 m ³ /km ²)	2011— 2019年 水源涵养 能力变化 Changes in water conservation capacity from 2011 to 2019	2011年 功能区 降水量 Precipitation in functional areas in 2011 /mm	2019年 功能区 降水量 Precipitation in functional areas in 2019/mm	2011— 2019年 降水量 Changes in precipitation from 2011 to 2019	2011年 功能区 蒸散发 Evapotranspiration in functional areas in 2011/mm	2019年 功能区 蒸散发 Evapotranspiration in functional areas in 2019/mm	2011—2019年 蒸散发变化 Changes in evapotranspiration from 2011 to 2019
南岭山地森林及生物多样性生态功能区	1186.83	1867.17	680.34	0.0073	0.0115	0.0042	1520.66	1934.15	413.49	475.91	519.93	44.02
桂东粤西丘陵水源涵养生态功能区	7.76	9.79	2.03	0.0079	0.0099	0.0021	1636.54	1844.55	208.01	637.61	631.23	-6.38
高原湖泊水源涵养生态功能区	24.13	87.72	63.59	0.0023	0.0084	0.0061	700.12	1525.27	825.15	370.77	448.57	77.79
桂东北丘陵山地水源涵养生态功能区	16.84	32.36	15.52	0.0067	0.0128	0.0061	1195.26	1818.70	623.44	444.44	360.59	-83.84
闽东丘陵常绿阔叶林生态功能区	34.19	24.35	-9.84	0.0093	0.0066	-0.0027	2695.51	1495.27	-1200.24	629.66	653.71	24.05
雪峰山水源涵养生态功能区	215.47	543.59	328.12	0.0043	0.0109	0.0066	988.34	1835.14	846.80	434.69	548.99	114.31
武夷山水源涵养生态功能区	76.88	154.89	78.01	0.0091	0.0184	0.0092	2373.53	2834.63	461.09	516.85	581.91	65.05
衡山水源涵养生态功能区	1.24	1.73	0.49	0.0070	0.0098	0.0028	1223.92	1638.55	414.62	354.51	473.37	118.85
罗霄山水源涵养生态功能区	12.34	19.37	7.03	0.0061	0.0096	0.0035	1265.21	1854.42	589.21	414.12	546.47	132.35
浙闽山区水源涵养生态功能区	210.89	277.24	66.35	0.0094	0.0124	0.0030	2777.74	1987.44	-790.30	503.51	567.85	64.34
中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区	58.81	65.52	6.71	0.0008	0.0008	0.0001	442.20	452.65	10.44	348.74	339.11	-9.63
三江源草原草甸湿地生态功能区	266.68	824.22	557.54	0.0005	0.0017	0.0011	387.64	488.42	100.78	325.62	277.84	-47.78
长白山森林生态功能区	148.77	677.36	528.60	0.0014	0.0062	0.0049	543.98	1173.11	629.13	364.81	386.40	21.59
祁连山冰川与水源涵养生态功能区	27.33	100.06	72.74	0.0001	0.0004	0.0003	169.95	288.46	118.51	166.24	168.79	2.55
幕阜山-九岭山水源涵养生态功能区	70.89	91.00	20.11	0.0058	0.0075	0.0017	1253.66	1523.93	270.28	486.34	572.72	86.37
黄山水源涵养生态功能区	193.91	250.37	56.46	0.0094	0.0121	0.0027	2947.99	2033.37	-914.62	503.81	619.49	115.68
天目山区水源涵养生态功能区	41.96	53.49	11.53	0.0095	0.0121	0.0026	2969.81	1869.56	-1100.25	432.76	531.74	98.99
雅江上游高寒草甸草原水源涵养区	23.89	24.86	0.98	0.0004	0.0004	0.0000	383.91	408.09	24.18	347.83	311.54	-36.29
雅江中游谷地水源涵养区	4.91	11.47	6.56	0.0005	0.0012	0.0007	450.97	483.89	32.93	339.11	280.04	-59.07
南水北调水源涵养生态功能区	438.28	462.78	24.50	0.0039	0.0042	0.0002	956.19	960.54	4.35	417.92	440.71	22.78
桐柏山水源涵养生态功能区	3.71	0.69	-3.02	0.0019	0.0004	-0.0016	709.11	542.54	-166.57	346.64	451.08	104.44
若尔盖草原湿地生态功能区	36.12	188.29	152.17	0.0013	0.0066	0.0053	696.26	1254.86	558.60	505.50	463.21	-42.28
甘南黄河重要水源补给生态功能区	13.38	162.61	149.22	0.0004	0.0047	0.0043	506.80	1019.43	512.63	468.37	429.24	-39.14
甘南盆地水源涵养生态功能区	0.20	24.77	24.57	0.0000	0.0032	0.0031	445.08	1069.51	624.43	464.46	453.83	-10.63
海东-甘南高寒草甸草原水源涵养功能区	0.33	10.22	9.88	0.0001	0.0022	0.0022	379.33	731.34	352.01	405.46	385.75	-19.71
衡水湖水源涵养生态功能区	5.63	0.87	-4.76	0.0023	0.0004	-0.0020	957.81	439.84	-517.97	209.91	264.10	54.19
白洋淀水源涵养生态功能区	3.49	0.46	-3.03	0.0028	0.0004	-0.0024	981.09	445.76	-535.33	226.17	274.22	48.05
京津水源涵养生态功能区	126.27	29.97	-96.30	0.0034	0.0008	-0.0026	903.82	580.89	-322.93	403.22	438.83	35.60
天山北坡森林草原水源涵养功能区	6.47	9.46	2.99	0.0001	0.0001	0.0004	159.41	187.51	28.10	255.66	254.97	-0.69
大小兴安岭森林生态功能区	371.51	2255.00	1883.49	0.0010	0.0058	0.0049	488.83	1039.35	550.52	357.78	329.05	-28.73
阿尔泰山地森林草原生态功能区	27.47	22.41	-5.06	0.0002	0.0002	-0.0004	179.02	176.35	-2.66	82.48	89.78	7.30
合计	3656.59	8284.09	4627.50	0.0018	0.0040	0.0022	33289.69	35937.52	2647.83	12240.91	13095.04	854.13

生态功能区东部、南水北调水源涵养生态功能区西部以及京津水源地水源涵养生态功能区东部,有 30.90% 转换为未利用地,主要分布在三江源草原草甸湿地生态功能区西北部和阿尔泰山地森林草原生态功能区。森林生态系统和湿地生态系统的稳定增长,保障了重点生态功能区重要生态系统服务功能的提高。全国水源涵养重点生态功能区生态系统情况见图 4 和表 4。

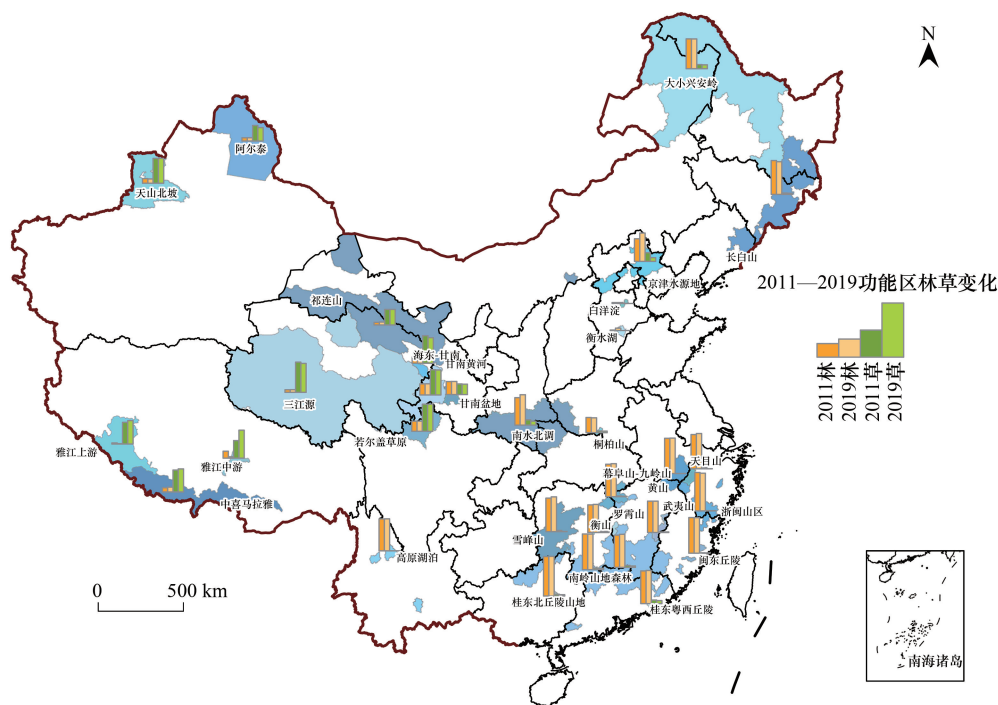


图 4 全国水源涵养重点生态功能区典型生态系统变化

Fig.4 Changes of typical ecosystems in the water conservation type national key ecological function areas

全国水源涵养型重点生态功能区中森林生态系统面积增长较为明显的功能区有京津水源地水源涵养生态功能区、海东-甘南高寒草甸草原水源涵养功能区、中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区、祁连山冰川与水源涵养生态功能区、南水北调水源涵养生态功能区、雪峰山水源涵养生态功能区,增幅均超过 10%,京津水源地水源涵养生态功能区的增幅最高,为 25.41%。森林生态系统面积降低较为明显的功能区有雅江上游高寒草甸草原水源涵养区、雅江中游谷地水源涵养区,降幅均超过 50%,雅江上游高寒草甸草原水源涵养区减少的林地中有 49.46% 转换为草地,49.82% 转换为未利用地,雅江中游谷地水源涵养区减少的林地中有 98.76% 转换为草地。

草地生态系统面积增长较为明显的功能区有雅江中游谷地水源涵养区、雅江上游高寒草甸草原水源涵养区、中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区,增幅分别为 59.09%、8.38%、5.36%。草地面积减少的功能区主要包括天目山区水源涵养生态功能区、雪峰山水源涵养生态功能区、京津水源地水源涵养生态功能区,降幅均超过 50%,三个功能区减少的草地 85% 以上都转换为森林,其中天目山区水源涵养生态功能区减少的草地中有 97.87% 转换为森林,雪峰山水源涵养生态功能区减少的草地中有 91.40% 转换为森林,京津水源地水源涵养生态功能区减少的草地中有 87.44% 转换为森林。

3.3 生态系统质量变化情况

本文选取植被覆盖度反映生态系统质量的状况。2011 年全国水源涵养重点生态功能区内平均植被覆盖度为 0.63,植被覆盖度较高的区域主要分布在我国东北部的大小兴安岭森林生态功能区、长白山森林生态功能区、中南部区域的南水北调水源涵养生态功能区以及南岭山地森林及生物多样性生态功能区等区域;植被覆盖度较低的区域主要分布在我国西北部区域,以阿尔泰山地森林草地生态功能区南部区域、祁连山冰川与

表 4 2011 年和 2019 年全国水源涵养重点生态功能区生态系统情况表
Table 4 Ecosystem situation table of water conservation type national key ecological function areas in 2011 and 2019

功能区名称	森林生态系统面积/km ²				草地生态系统面积/km ²				湿地生态系统面积/km ²				
	2011 年		2019 年		2011 年		2019 年		2011 年		2019 年		
	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%	变化量/km ²	变化率/%	
南岭山地森林及生物多样性生态功能区	116234.06		119039.86	2805.80	2.41%	6725.30	4683.65	-2041.64	-30.36%	2386.09	2583.56	197.47	8.28%
桂东粤西丘陵水源涵养生态功能区	717.64		727.60	9.96	1.39%	77.73	66.80	-10.93	-14.06%	4.49	4.76	0.27	6.03%
高原湖泊水源涵养生态功能区	7434.01		7459.62	25.61	0.34%	19.41	19.35	-0.07	-0.35%	210.97	219.70	8.73	4.14%
桂东北丘陵山地水源涵养生态功能区	2223.83		2163.74	-60.09	-2.70%	98.31	68.87	-29.44	-29.95%	20.20	27.68	7.48	37.04%
闽东丘陵常绿阔叶林生态功能区	2920.49		2911.04	-9.44	-0.32%	31.96	28.74	-3.22	-10.08%	33.04	40.00	6.97	21.09%
雪峰山水源涵养生态功能区	37246.07		38682.41	1436.34	3.86%	1330.24	130.71	-1199.53	-90.17%	700.91	782.91	81.99	11.70%
武夷山水源涵养生态功能区	5905.86		5896.98	-8.88	-0.15%	105.67	104.85	-0.82	-0.77%	154.64	154.86	0.22	0.14%
衡山水源涵养生态功能区	140.39		140.15	-0.24	-0.17%	6.03	5.55	-0.48	-7.91%	0.64	0.79	0.15	23.80%
罗霄山水源涵养生态功能区	1244.12		1265.56	21.44	1.72%	59.33	47.68	-11.65	-19.64%	30.42	33.19	2.77	9.11%
浙闽山区水源涵养生态功能区	19138.04		18798.84	-339.20	-1.77%	165.39	156.43	-8.95	-5.41%	255.92	256.63	0.72	0.28%
中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区	7245.04		8169.35	924.30	12.76%	37695.35	39715.96	2020.60	5.36%	6552.81	6634.63	81.81	1.25%
三江源草原草甸湿地生态功能区	28974.85		29094.55	119.70	0.41%	330762.28	317668.96	-13093.32	-3.96%	24200.78	26737.14	2536.36	10.48%
长白山森林生态功能区	82596.19		79675.96	-2920.24	-3.54%	3276.77	2834.34	-442.43	-13.50%	1331.27	1158.46	-172.81	-12.98%
祁连山冰川与水源涵养生态功能区	12979.50		14465.81	1486.31	11.45%	77870.25	78209.61	339.36	0.44%	7847.21	7901.51	54.30	0.69%
幕阜山—九岭山水源涵养生态功能区	8799.43		8964.88	165.45	1.88%	180.86	116.40	-64.46	-35.64%	237.76	238.21	0.45	0.19%
黄山水源涵养生态功能区	16306.72		16359.39	52.67	0.32%	40.71	36.28	-4.43	-10.87%	345.16	362.66	17.50	5.07%
天目山区水源涵养生态功能区	3383.99		3479.67	95.68	2.83%	103.52	6.03	-97.49	-94.18%	486.87	487.68	0.81	0.17%
雅江上游高寒草甸草原水源涵养区	1295.59		454.38	-841.21	-64.93%	27088.25	29358.91	2270.66	8.38%	5191.85	3505.68	-1686.17	-32.48%
雅江中游谷地水源涵养区	1506.83		298.13	-1208.71	-80.21%	3835.24	6101.62	2266.37	59.09%	893.87	1250.67	356.81	39.92%
南水北调水源涵养生态功能区	68151.35		75395.31	7243.96	10.63%	13151.24	9885.63	-3265.61	-24.83%	1663.51	1954.00	290.48	17.46%
桐柏山水源涵养生态功能区	647.19		635.15	-12.03	-1.86%	71.36	64.85	-6.52	-9.13%	31.68	33.02	1.34	4.22%
若尔盖草原湿地生态功能区	6525.68		6529.06	3.38	0.05%	17413.17	17458.43	45.26	0.26%	377.89	383.36	5.47	1.45%
甘南黄河重要水源补给生态功能区	8737.09		8749.51	12.42	0.14%	19814.78	19570.08	-244.69	-1.23%	787.86	776.77	-11.08	-1.41%
甘南盆地水源涵养生态功能区	2272.58		2286.39	13.81	0.61%	1854.19	1815.90	-38.30	-2.07%	60.68	63.20	2.53	4.17%
海东-甘南高寒草甸草原水源涵养功能区	647.47		785.87	138.40	21.37%	2795.05	2607.89	-187.16	-6.70%	117.22	117.48	0.26	0.22%
衡水湖水源涵养生态功能区	25.35		127.28	101.93	402.07%	0.00	0.93	0.93	93%	65.39	166.60	101.21	154.79%
白洋淀水源涵养生态功能区	24.81		24.32	-0.49	-1.99%	3.04	0.70	-2.35	-77.11%	125.89	117.43	-8.46	-6.72%
京津水源地区水源涵养生态功能区	18761.44		23529.23	4767.79	25.41%	7214.21	3114.14	-4100.07	-56.83%	618.53	1003.88	385.35	62.30%
天山北坡森林草原水源涵养功能区	6965.21		6529.82	-435.39	-6.25%	38121.02	38018.59	-102.43	-0.27%	3933.11	3994.52	61.41	1.56%
大小兴安岭森林生态功能区	258278.63		257938.90	-339.73	-0.13%	35890.20	33585.70	-2304.50	-6.42%	2661.38	2983.60	322.22	12.11%
阿尔泰山地森林草原生态功能区	8636.22		8497.00	-139.22	-1.61%	41011.61	35352.94	-5658.67	-13.80%	2070.06	2625.71	555.65	26.84%
总计 Total	735965.68		749075.75	13110.07	1.78%	666812.47	640836.52	-25975.95	-3.90%	63398.08	66600.30	3202.22	5.05%

水源涵养生态功能区北部区域、三江源草原草甸湿地生态功能区北部区域、雅江上游高寒草甸草原水源涵养生态功能区、雅江中游谷地水源涵养生态功能区以及中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养生态功能区为主。

2019 年全国水源涵养重点生态功能区内平均植被覆盖度为 0.64, 与 2011 年相比有所增加, 植被覆盖度较高及较低的分布区域与 2011 年相同(图 5)。从功能区内森林和草地生态系统的植被覆盖度来看, 阿尔泰山地森林草原生态功能区、甘南黄河重要水源补给生态功能区和南岭山地森林及生物多样性生态功能区等 10 个重点生态功能区内的森林和草地生态系统的植被覆盖度都有所提高。雅江中游谷地水源涵养区和幕阜山-九岭山水源涵养生态功能区均是森林生态系统的植被覆盖度降低, 草地生态系统的植被覆盖度上升。中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区、雅江上游高寒草甸草原水源涵养区则相反, 均是森林生态系统的植被覆盖度上升, 草地生态系统的植被覆盖度降低。水源涵养型国家重点生态功能区内森林、草地主要生态系统的植被覆盖度情况见表 5。

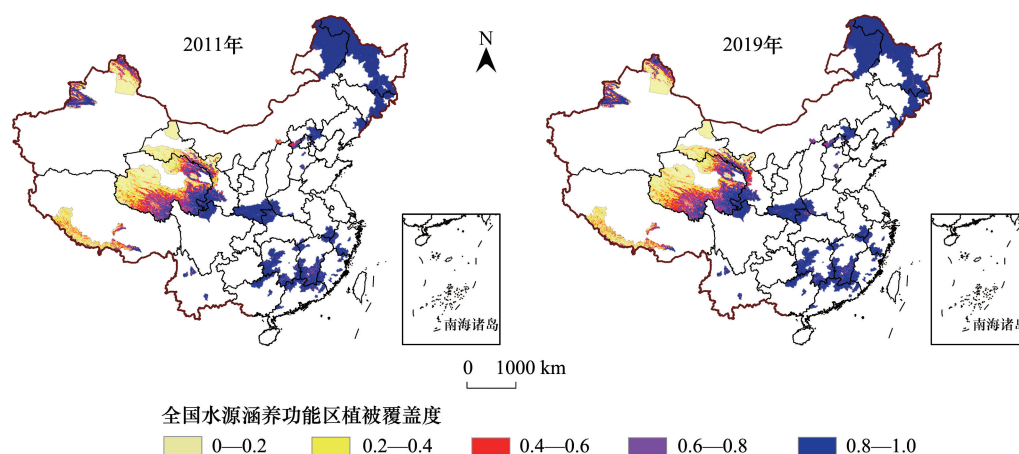


图 5 全国水源涵养重点生态功能区植被覆盖度

Fig.5 Vegetation coverage in water conservation type national key ecological function areas

4 结论与讨论

4.1 结论

本文在全国水源涵养型重点生态功能区范围内进行 2011 年和 2019 年水源涵养功能评估, 并结合各功能区主要生态系统类型对评估结果进行综合分析比较, 得出以下结论:

(1) 我国水源涵养型重点生态功能区水源涵养量呈现从西北部到东南部逐渐增加的空间分布趋势。国家重点生态功能区转移支付自 2011 年实施以来, 水源涵养型国家重点生态功能区生态系统状况总体好转, 水源涵养总量呈现明显增加。

(2) 森林和湿地生态系统面积增加, 保障了重点生态功能区重要生态系统服务功能的提高。

(3) 转移支付政策实施以来水源涵养型国家重点生态功能区植被覆盖度有所增加, 生态系统质量提高。

(4) 总体来看, 转移支付政策天然林保护、退耕还林、退牧还草等工程的实施对全国水源涵养重点生态功能区森林、草地生态系统水源涵养服务的提升发挥了积极作用。2011 年到 2019 年全国水源涵养型重点生态功能区基本上地达到了转移支付政策预期的阶段性目标。

4.2 讨论

生态系统服务功能是国家实施生态补偿和构建生态安全屏障的重要基础和依据。从本文研究结果来看, 实施转移支付政策以来, 2019 年水源涵养型国家重点生态功能区的水源涵养服务整体呈现增加趋势, 但少数功能区呈现下降趋势, 这些功能区应该引起足够重视, 加大生态保护力度, 避免生态系统服务功能的退化和恶

化。另外,本文仅对转移支付政策实施之后的 2011 和 2019 年两个年份进行了水源涵养功能的评估,如果在数据可获取的情况下,可进行水源涵养功能的逐年评估,以便更好的评估转移支付政策的阶段性实施效果。

表 5 各功能区森林、草地生态系统植被覆盖度

Table 5 Vegetation coverage of forest and grassland ecosystem in each water conservation type national key ecological function areas

功能区名称 Function areas name	2011 年森林 植被覆盖度 2011 Forest vegetation coverage	2011 年草地 植被覆盖度 2011 Grassland vegetation coverage	2019 年森林 植被覆盖度 2019 Forest vegetation coverage	2019 年草地植被覆盖度 2019 Grassland vegetation coverage
阿尔泰山地森林草原生态功能区	0.65	0.43	0.72	0.45
大小兴安岭森林生态功能区	0.97	0.94	0.96	0.92
甘南黄河重要水源补给生态功能区	0.86	0.82	0.88	0.84
南水北调水源涵养生态功能区	0.95	0.93	0.95	0.92
南岭山地森林及生物多样性生态功能区	0.90	0.88	0.92	0.89
祁连山冰川与水源涵养生态功能区	0.64	0.43	0.70	0.47
若尔盖草原湿地生态功能区	0.88	0.88	0.89	0.88
三江源草原草甸湿地生态功能区	0.76	0.43	0.78	0.47
长白山森林生态功能区	0.98	0.96	0.98	0.95
京津水源地水源涵养生态功能区	0.90	0.83	0.88	0.81
雪峰山水源涵养生态功能区	0.91	0.92	0.91	0.92
中喜马拉雅山北翼高寒草原水源涵养区	0.81	0.35	0.82	0.32
高原湖泊水源涵养生态功能区	0.87	0.85	0.89	0.87
桂东北丘陵山地水源涵养生态功能区	0.94	0.90	0.94	0.92
海东-甘南高寒草甸草原水源涵养功能区	0.72	0.54	0.77	0.61
黄山水源涵养生态功能区	0.93	0.90	0.93	0.89
罗霄山水源涵养生态功能区	0.93	0.91	0.92	0.90
幕阜山-九岭山水源涵养生态功能区	0.91	0.89	0.90	0.90
天山北坡森林草原水源涵养功能区	0.82	0.68	0.81	0.67
武夷山水源涵养生态功能区	0.91	0.87	0.92	0.89
雅江上游高寒草甸草原水源涵养区	0.32	0.28	0.37	0.27
雅江中游谷地水源涵养区	0.69	0.53	0.67	0.54
桂东粤西丘陵水源涵养生态功能区	0.90	0.86	0.93	0.90
衡山水源涵养生态功能区	0.93	0.97	0.92	0.97
闽东丘陵常绿阔叶林生态功能区	0.90	0.84	0.92	0.88
天目山区水源涵养生态功能区	0.93	0.95	0.93	0.88
浙闽山区水源涵养生态功能区	0.92	0.90	0.92	0.91

此表格统计不包括四个以耕地生态系统类型为主的生态功能区

水量平衡法是研究水源涵养机理的基础,能够比较准确地计算水源涵养量,而且容易操作,因此理论上讲是计算水源涵养量最完美的方法,也是目前使用频率最高的方法。但依然存在不确定性问题,一是蒸散发目前还难以实现精准测量;二是研究区的空间异质性问题一般被忽略掉。本研究中对地表径流的估算对不同区域的同一种生态系统类型采取同一个地表径流系数,具有极大的不确定性,会对评价结果产生一定的误差。因此如何结合水文学知识,集成成熟的径流计算模型,获得较为准确的流域尺度径流估算值,进而提高水源涵养量的估算精度是未来研究工作的重点之一。同时,建议在水源涵养型国家重点生态功能区内逐步建设生态系统服务功能数据观测共享平台,观测收集与水源涵养能力相关的各个重要因子数据,便于更好的监测功能区水源涵养功能的变化情况。

根据水源涵养功能评估方法可知,对水源涵养功能影响最大的两类因素为气候因子和下垫面因子。而人为干预很难做到直接快速的改善区域内气候状况,所以采用改善下垫面特征是相对较为适合、且效果较好的

改善地区水源涵养功能的方法。因此可以通过控制城市无序扩张、减少裸地面积、增加森林草地湿地面积、改善森林结构等方式改善土地覆被类型,从而从整体上提高区域的水源涵养功能,体现转移支付资金的使用效益。

参考文献 (References):

- [1] 财政部. 财政部关于印发《国家重点生态功能区转移支付(试点)办法》的通知. (2009-12-25). <https://wenku.baidu.com/view/e379ee08f12d2af90242e68b.html>.
- [2] 李国平, 李潇, 汪海洲. 国家重点生态功能区转移支付的生态补偿效果分析. 当代经济科学, 2013, 35(5): 58-64.
- [3] 李国平, 汪海洲, 刘倩. 国家重点生态功能区转移支付的双重目标与绩效评价. 西北大学学报: 哲学社会科学版, 2014, 44(1): 151-155.
- [4] 何立环, 刘海江, 李宝林, 王业耀. 国家重点生态功能区县域生态环境质量考核评价指标体系设计与应用实践. 环境保护, 2014, 42(12): 42-45.
- [5] 伏润民, 缪小林. 中国生态功能区财政转移支付制度体系重构——基于拓展的能值模型衡量的生态外溢价值. 经济研究, 2015, 50(3): 47-61.
- [6] 李国平, 刘倩, 张文彬. 国家重点生态功能区转移支付与县域生态环境质量——基于陕西省县级数据的实证研究. 西安交通大学学报: 社会科学版, 2014, 34(2): 27-31.
- [7] 徐鸿翔, 张文彬. 国家重点生态功能区转移支付的生态保护效应研究——基于陕西省数据的实证研究. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 141-148.
- [8] 孙小涛, 周忠发, 陈全, 陈继军, 张珊珊. 重点生态功能区水土流失敏感性评价与分布研究——以贵州省雷山县为例. 水土保持学报, 2016, 30(6): 73-78, 133-133.
- [9] 冯倩, 周忠发, 侯玉婷, 陈全, 王历, 谭玮颐. 水源涵养型国家重点生态功能区生态功能评价: 以贵州省三都水族自治县为例. 环境工程, 2017, 35(12): 154-158.
- [10] 吴丹, 邹长新, 高吉喜, 林乃峰. 水源涵养型重点生态功能区生态状况变化研究. 环境科学与技术, 2017, 40(01): 174-179.
- [11] 国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知. (2011-06-08). http://www.gov.cn/jzwgk/2011-06/08/content_1879180.htm.
- [12] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 杨存建. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算. 生态环境学报, 2013, 22(3): 451-457.
- [13] 李佳, 邵全琴, 刘纪远. 基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算——以江西兴国县为例. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 83-87.
- [14] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究. 资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
- [15] 程根伟, 石培礼. 长江上游森林涵养水源效益及其经济价值评估. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 17-20.
- [16] 胡利利, 李亦秋, 杨广斌, 陈盼盼, 邓欧, 赵唯茜. 贵州省生态系统水源涵养价值估算. 贵州农业科学, 2017, 45(11): 155-159.
- [17] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. 水土保持研究, 2016, 23(5): 256-260.
- [18] 齐静, 袁兴中, 刘红, 邓伟. 重庆市三峡库区水源涵养重要功能区生态系统服务功能时空演变特征. 水土保持通报, 2015, 35(3): 256-260, 266-266.
- [19] 张庆费, 周晓峰. 黑龙江省汤旺河和呼兰河流域森林对河川年径流量的影响. 植物资源与环境, 1999, 8(1): 22-27.
- [20] 乔飞, 富国, 徐香勤, 安立会, 雷坤, 赵健, 郝晨林. 三江源区水源涵养功能评估. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1010-1018.
- [21] 王纪伟, 刘康, 瓮耐义. 基于 In-VEST 模型的汉江上游森林生态系统水源涵养服务功能研究. 水土保持通报, 2014, 34(5): 213-217.
- [22] 张福平, 李肖娟, 冯起, 王虎威, 魏永芬, 白皓. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1321-1329.
- [23] 杨金明. 基于分布式水文模型的森林水源涵养功能评价——以新林流域为例[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [24] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [25] 陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 陈海. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. 地理科学, 2016, 36(10): 1546-1554.
- [26] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轼, 李勇志. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2014, 34(1): 216-223.
- [27] 聂忆黄, 龚斌, 农学文. 青藏高原水源涵养能力评估. 水土保持研究, 2009, 16(5): 210-212.
- [28] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 魏伟. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. 生态学报, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [29] 卢慧, 陈克龙, 曹生奎, 韩艳莉, 马进. 青海湖流域生态系统服务功能与价值评估. 生态经济, 2011, (11): 145-147.
- [30] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [31] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, 2009(3): 155-160.