

DOI: 10.5846/stxb202107191937

张昌顺, 范娜, 刘春兰, 谢高地. 1990—2018 年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变. 生态学报, 2023, 43(13): 5536-5545.

Zhang C S, Fan N, Liu C L, Xie G D. Spatio-temporal pattern and evolution of ecosystem water conservation in China from 1990 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5536-5545.

1990—2018 年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变

张昌顺^{1,2,*}, 范娜³, 刘春兰⁴, 谢高地^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 中国寰球工程有限公司, 北京 100029

4 北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037

摘要: 探明生态系统水源涵养服务格局演变对中国生态系统水源涵养保护和管理具有重要意义。采用水量平衡模型, 探明 1990—2018 年中国生态系统水源涵养分布特征, 从全国、分区和栅格 3 个尺度揭示中国水源涵养演变规律。结果表明: (1) 中国生态系统水源涵养时空异质性显著, 整体南高北低、东高西低。不同植被水源涵养服务差异显著, 以常绿阔叶林最高, 草地最低。(2) 中国水源涵养服务随高程升高呈阶梯式下降, 随坡度变化因坡度梯度而不同, 平坡区随坡度升高而升高, 缓坡—陡坡区随坡度升高而降低。(3) 中国多年平均水源涵养量为 $1.54 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$, 以热带-亚热带季风区为主导, 约占总量的 77.9%。水源涵养服务演变全国尺度显著下降, 分区尺度仅温带大陆气候区显著下降。(4) 栅格尺度仅 16.0% 栅格变化显著, 主要为极显著降低和显著降低, 约占栅格总数的 7.61% 和 5.30%, 主要分布于藏东南、云贵高原西部、冀东北、浑善达克沙地、天山东麓和台湾省等地, 它们是中国水源涵养保护与建设的重点区域。

关键词: 水源涵养; 时空演变; 回归分析; 生态系统保护与管理

Spatio-temporal pattern and evolution of ecosystem water conservation in China from 1990 to 2018

ZHANG Changshun^{1,2,*}, FAN Na³, LIU Chunlan⁴, XIE Gaodi^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China Huanqiu Contracting and Engineering Corporation, Beijing 100029, China

4 Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China

Abstract: Water conservation is one of the important ecological services restricting regional sustainable development, which is of great significance to regional industrial and agricultural production, life and ecological protection and construction. Therefore, the research on ecosystem water conservation has become an important field of ecological service research. It is of great significance for the protection and management of ecosystem water conservation for China to explore the spatio-temporal variation of ecosystem water conservation. To reveal the spatio-temporal pattern and evolution of ecosystem water conservation in China, the water balance equation was used to estimating ecosystem water conservation in China from 1990 to 2018. Based on the Matlab platform, the spatio-temporal patterns and change trends of China's ecosystem water

基金项目: 国家重点研究计划(2016YFC0500204); 广西科技重大专项(桂科 AA20161002-3)

收稿日期: 2021-07-19; **网络出版日期:** 2023-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangcs@igsnrr.ac.cn

conservation were revealed on national, regional and grid scales using spatial statistics and trend analysis method. The main results were as follows: (1) The spatial and temporal heterogeneity of water conservation in the Chinese ecosystem was significant, which decreased from south to north, and from east to west. There were significant differences in water conservation capacity among different vegetation types, which was highest in evergreen broadleaved forests and lowest in grasslands. (2) The ecosystem water conservation decreased with altitude, however, its variation characteristics were different in different slope gradients. The ecosystem water conservation increased with the increase of slope in flat slope area, while in gentle slope to steep slope area, it decreased with the increase of slope with little fluctuation. (3) The amount of annually average ecosystem water conservation in China was about $1.54 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$, which was dominated by the tropical and subtropical monsoon zonal with $1.20 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$, accounting for about 77.9% of the total. The ecosystem water conservation in China decreased significantly at national scales from 1990 to 2018. Only the temperate continental climate zone had a significant decrease in ecosystem water conservation, and no significant change in the others at regional scales during the study period. (4) The ecosystem water conservation of most grids did not change significantly from 1990 to 2018 on grid scales, accounting for about 84.01% of the total grids. The grids with significant changes in ecosystem water conservation were mainly extreme decrease and significant decrease, accounting for 7.61% and 5.30% of the total grids, respectively, which were mainly distributed in southeastern Tibet, western Sichuan, northern, central and western Yunnan, northeastern Hebei, Hunshandake Sandy Land, eastern Tianshan Mountain and Taiwan province, where were the key areas of water conservation, protection and construction in China. The total of grids with extreme and significant increase in water conservation totally accounted for 2.36% of the total grids, which mainly scattered in central Qinghai, Qinling Mountains, Northeast Plain and the northern Greater Khingan Mountains. Based on the distributions of significant changes in the ecosystem water conservation in China on grid scales from 1990 to 2018, the leading driving factors for ecosystem water conservation changed significantly could be revealed by combining the spatial data of China's ecological protection and construction, climate variations, landuse change and urbanization construction. Therefore, the study can provide data support for the conservation and regulation of water resources in China's ecosystem.

Key Words: ecosystem water conservation; spatio-temporal evolution; regression analysis; ecosystem protection and management

生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,是人类社会发展的物质基础。正因此,生态系统服务已成为国际生态学、经济学和资源环境学等多学科研究的前沿和热点^[1-4]。水源涵养服务是重要的供给服务,其内涵已由供给水源,拓展为拦蓄降水、水源供给、调节径流、洪水调蓄、水质净化等多种服务组成的综合体,其变化不仅直接影响区域水文、植被生长与发育,还制约着区域社会经济的发展,是区域生态与环境状况的重要指示器^[5-8]。正因此,国内外对生态系统水源涵养进行了大量研究^[1, 9-11]。

目前为止,中国生态系统水源涵养研究主要集中在水源涵养内涵、评估方法、重要性评估等方面。关于生态系统水源涵养概念,龚诗涵等认为早期水源涵养指生态系统对流域径流量的影响^[6]。后来生态系统拦蓄降雨、土壤持水逐渐受到重视^[11],之后水源涵养概念扩展到生态系统结构、质量与格局在各水文过程中的作用与贡献^[8, 12]。生态系统水源涵养评估或计量方法因水源涵养内涵的不同而不同,常用评估方法有土壤蓄水法、综合蓄水法、水量平衡法、综合指数法等,如姜志林详细介绍了土壤蓄水法的评估方法与影响因素^[13];莫非等采用综合蓄水法研究了东灵山不同森林水源涵养功能,并用多因子综合评价法评估了不同森林水源涵养功能高低^[14]。刘业轩等采用水量平衡法和综合蓄水法对比研究了福建森林水源涵养功能,发现水量平衡法侧重气象、地形和土地覆被因素,而综合蓄水法侧重林分条件^[15]。程唱等利用综合指数法对比研究了干旱半干旱不同人工林水源涵养能力,发现白桦×青杨混交林水源涵养能力最强,青杨林最弱^[16]。总之,不同评估方

法对应着不同的水源涵养内涵与研究目的,致使不同方法有不同的数据需求与适用范围。土壤蓄水法、综合蓄水法、综合指数法等因评估精度受研究区实测数据数量的制约,致使它们主要适用于样地等小尺度研究,而水量平衡法因是水源涵养机理模型且操作简单、数据可达性强而成为目前最常用的方法。正因此,本研究采用水量平衡法动态拟合 1990—2018 年中国生态系统水源涵养量。关于水源涵养演变趋势研究,目前较多研究几期生态系统水源涵养量来研究区域整体或不同区域水源涵养服务演变规律,如薛健等通过研究 1980—1990 年、1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2017 年四时段祁连山平均水源涵养量,揭示该区域不同子流域、不同植被水源涵养服务变化特征^[17]。张福平通过四期数据研究了黑河流域上游水源涵养演变特征^[18]。只有极少数长时间序列动态研究区域生态系统水源涵养演变特征^[19]的报道,如吕乐婷等 1980—2016 年长时间序列动态研究了三江源国家公园整体水源涵养时空演变特征^[19];尹云鹤等动态研究了气候变化长时间序列对黄河源区水源涵养的影响^[20]。中国依然缺少长时间序列栅格尺度水源涵养演变规律研究。

中国水资源贫乏,时空分布不均,水土资源组合不平衡,且水资源年际变化大^[21],探明中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变规律,不仅有助于科学认识和合理保护中国重要生态系统水源涵养功能区,还可为中国生态系统水源涵养调控与生态系统管理提供数据支撑。正因此,本研究利用水量平衡模型,探明中国生态系统水源涵养空间格局,从全国、分区和栅格尺度揭示中国长时间序列生态系统水源涵养演变特征,以期为中国生态系统水源涵养保护与建设、生态补偿等提供数据。

1 研究方法

1.1 水源涵养核算

单位面积水源涵养量(即水源涵养能力)采用水量平衡方程核算。水量平衡原理是指在一定的时空内,水分的运动保持着物质守恒定理,或输入的水量和输出的水量之间的差额等于系统内蓄水的变化量。

$$Q_{\text{water conservation}} = P - R - ET$$

式中, $Q_{\text{water conservation}}$ 为单位面积水源涵养量, $\text{mm m}^{-2} \text{a}^{-1}$; P 为单位面积降雨量, $\text{mm m}^{-2} \text{a}^{-1}$; R 为单位面积地表径流量, $\text{mm m}^{-2} \text{a}^{-1}$; ET 为单位面积年蒸散发量, $\text{mm m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。在没有人为干扰条件下,降水量减去蒸散量等于产水量,故在此先利用 INVEST 软件产水模块核算出产水量,再利用各类生态系统平均地表径流系数、土地覆被和年降水量数据获得单位面积地表径流量,进而获得单位面积水源涵养量。具体核算方法详见文献^[6, 22—23]。本研究利用 CERN 台站水文监测数据对核算结果进行验证,结果表明,模型拟合结果与台站野外监测结果极显著线性相关,说明本研究模型拟合结果较科学合理。图 1 是 2010 年 CERN 台站实测值和拟合值的数量关系。

1.2 数据来源

本研究用到的主要数据包括 1990、1995、2000、2010 和 2015 年土地覆被、历年气象、高程、土壤、叶面积指数及文献数据等,其中五期土地覆被数据和叶面积指数数据来自中国科学院遥感与数字地球研究所;气象数据来自中国气象数据网;潜在蒸散数据利用彭曼公式计算后克里格插值获得;蒸散系数利用 LAI 指数计算获得;土壤可利用水量利用土壤数据中的质地数据计算获得;根系深度和平均径流系数则利用文献数据获得。本研究主要数据来源与处理方法详见表 1。

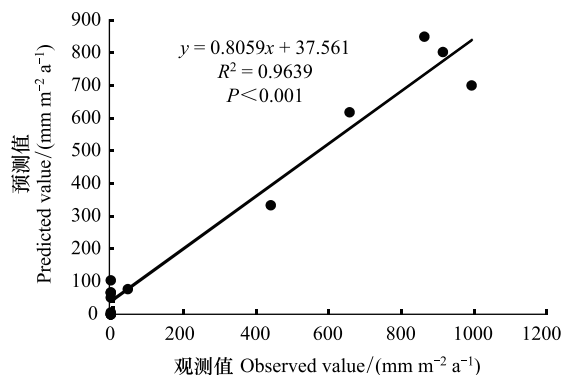


图 1 2010 年水源涵养实测值与拟合值间的相互关系

Fig.1 The correlation between measured water conservation and fitting value in 2010 year

表 1 数据来源与处理方法
Table 1 Sources and treatments of principal data

数据 Data	分辨率 Data resolution	来源/处理方法 Data source/treatment
生态系统分布 Ecosystem classification	1 km	1990、2000、2005、2010 和 2015 年土地覆被数据中国科学院遥感与数字地球研究所
气象数据 Meteorological data	Excel	1990—2018 年历年气象数来自中国气象数据网
潜在蒸散发 Potential evapotranspiration	Excel	利用气象数据采用彭曼模型核算 ^[24]
高程数据 Digital elevation model data	90 m	国家地球系统科学数据中心
根系深度 Root depth	1 km	根据植被覆被类型查阅先关文献 ^[25—27]
土壤可利用水含量 Soil available water content	1 km	利用土壤质地数据计算 ^[28]
蒸散系数 Evapotranspiration coefficient	1 km	根据 1990—2018 年历年平均叶面积指数计算 ^[25]
叶面积指数 Leaf area index	1 km	1990—2018 年历年每月中国科学院遥感与数字地球研究所
土壤数据 Soil Data	1:1000000	第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据,包括土壤深度、土壤有机质、粘粒、粉粒和砂粒等含量

1.3 数据分析方法

1.3.1 全国和分区尺度趋势分析

全国和分区尺度水源涵养趋势分析均利用 SPSS 软件进行回归分析再在 Excel 中制图。首先在 ArcMap 中利用 Zonal Statistics as Table 命令获得历年全国和分区单位面积水源涵养量及水源涵养总量,再在 SPSS 统计软件中进行线性回归分析,最后在 Excel 中制图^[29]。

1.3.2 栅格尺度趋势分析

1990—2018 年中国栅格尺度水源涵养服务趋势分析同样也是进行线性回归分析,首先在 ArcMap 中将栅格数据转化成 txt 数据,再将 txt 数据导入 MATLAB 中进行线性回归分析,获得各栅格的 Slope、F 值及其显著性特征,最后将分析结果转化成栅格数据在 ArcMap 中制图。

2 结果与分析

2.1 水源涵养功能空间格局与演变

2.1.1 整体空间格局

1990—2018 年中国生态系统水源涵养总量及其能力平均分别为 15396.2 亿 m^3/a 和 $164.0 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。中国生态系统水源涵养功能时空异质性显著,空间格局整体呈现东高西低、南高北低的分布态势,其中大于 $1000 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的高值区主要分布于热带-亚热带季风区的长江中下游地区, $600—1000 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的次高值区主要分布于长江中下游和华南地区,小于 $50 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的低值区广泛分布于西北、青藏高原、内蒙古、华北平原和东北平原地区(图 2)。受年际波动的影响,中国生态系统水源涵养高值区主要在长江中下游和华南地区移动,而东北和青藏高原西南部地区是中国生态系统水源涵养波动较大的区域。1990—2018 年 6 期水源涵养空间分布详见图 2。

深入分析发现,不同植被多年平均水源涵养能力以常绿阔叶林最高,约 $607.7 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,园地次之,约 $490.1 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,随后依次为常绿针叶林、针阔混交林、灌丛、农田、落叶阔叶林、落叶针叶林和草地(图 3)。水源涵养服务在植被间的变化特征是植被分布、年降水量和人类活动等综合作用的结果。

2.1.2 随海拔变化规律

中国地势存在明显的阶梯分布:第一阶梯是青藏高原,平均海拔 $\geq 4000 \text{ m}$;第二阶梯由青藏高原外缘至大兴安岭、太行山、巫山和雪峰山之间,平均海拔 $\geq 1000 \text{ m}$,主要由广阔的高原和大盆地组成;第三阶梯为中国东部广阔的平原和山地丘陵,海拔范围主要为 $< 1000 \text{ m}$ 地区^[30]。根据上述地貌海拔特征,将中国高程数据分为 3 级,提取不同高程梯度内多年平均单位面积水源涵养量(表 2)。低海拔地区主要为东北平原、黄淮海平原、

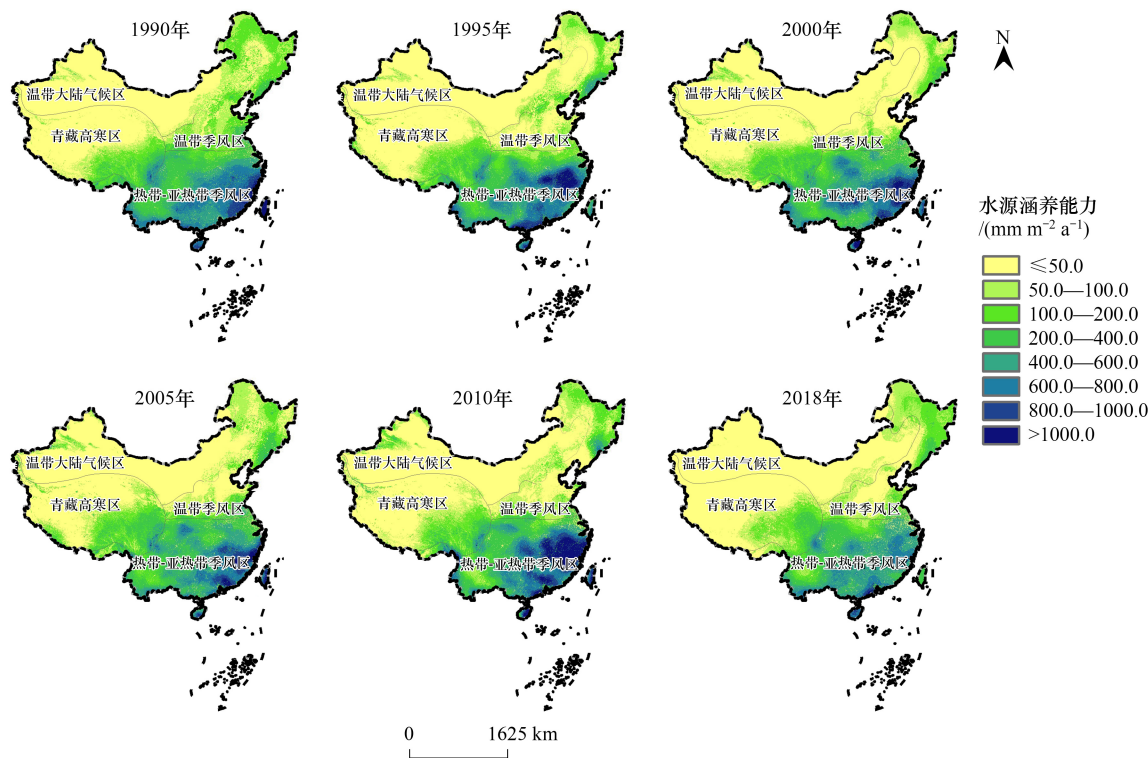


图2 1990—2018 年这结果生态系统水源涵养量空间分布

Fig.2 The spatial distribution of China's ecosystem water conservation from 1990 to 2018

长江中下游平原以及江南广大地区的丘陵区,降雨量丰沛,植被类型丰富且覆盖度高,该区生态系统水源涵养能力服务均值最高。高海拔地区主要为青藏高寒区,降雨少,植被类型为高山灌丛、高寒草甸、高寒草原,植被覆盖度低,该区生态系统水源涵养能力均值最低。中国生态系统水源涵养能力随着高程的升高总体呈现降低的趋势(图4),但在不同高程阶梯内的变化特征不尽相同,低海拔地区水源涵养能力随着海拔的升高呈较强的下降趋势,且降幅较大;中海拔地区生态系统水源涵养能力随海拔升高呈阶梯式波动,海拔 1000—2800 m 范围为水源涵养的第一阶梯区,区内水源涵养能力随着海拔升高而增加,海拔 2800—4000 m 范围为水源涵养

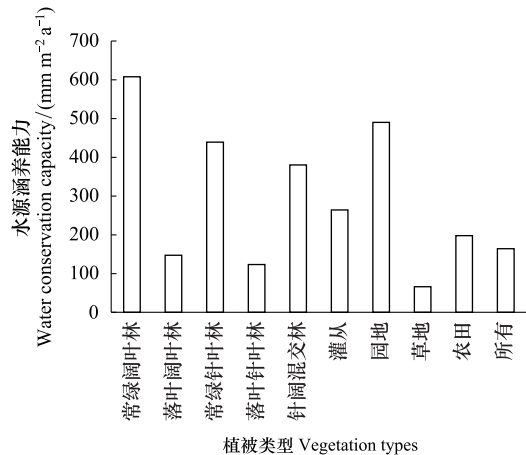


图3 不同植被类型水源涵养服务特征

Fig.3 The characteristics of water conservation services of different vegetation types

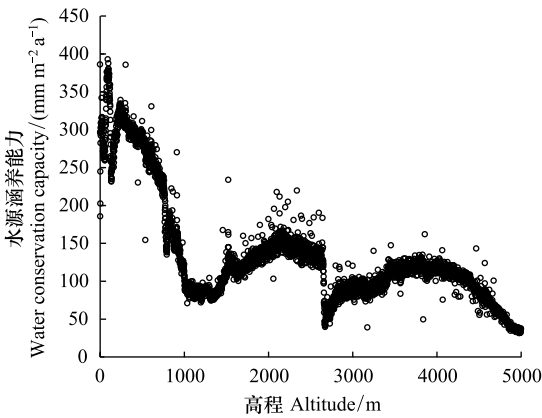


图4 中国生态系统水源涵养量与高程关系

Fig.4 Relationship between altitude and water conservation of ecosystems in China

的第二阶梯,区内的水源涵养能力也随着海拔升高,但总体上第二阶梯内的水源涵养能力低于第一阶梯区,这与山区降水量随地势抬升而增加有关,第一阶梯主要分布于热带、亚热带区域,而第二阶梯主要分布于云贵高原与青藏高原的过渡带上,这里主要受西南季风的影响,由于地处内陆,年降水量随海拔升高而增大的幅度小于东部热带-亚热带地区。高海拔区生态系统水源涵养能力随着海拔升高急剧降低。

表 2 不同海拔梯度水源涵养能力均值统计

Table 2 Mean statistics of water conservation capacity of different altitude gradients

坡度分级 Elevation gradients	水源涵养能力 Water conservation capacity/(mm m ⁻² a ⁻¹)	坡度分级 Elevation gradients	水源涵养能力 Water conservation capacity/(mm m ⁻² a ⁻¹)
低海拔 Low elevation<1000 m	263.25	高海拔 High elevation>4000 m	81.93
中海拔 Middle elevation 1000—4000 m	101.65		

2.1.3 随坡度变化规律

根据《森林资源规划设计调查主要技术规定》(2003 年 4 月),将中国坡度数据分为 6 级,提取不同坡度梯度内的多年平均水源涵养量(表 3)。结果表明,中国水源涵养能力以平坡地区最小,以险坡地区最大。平坡地区主要分布于年降水量较小的西北和年降水量较大但主要种植农作物的华北平原、东北平原、成都平原和长江中下游平原等地,而险坡主要分布于降水量较大的南方山地丘陵区,如福建武夷山地区坡陡降水量又大,此外,云岭、南岭、四川盆周山地、秦岭、长白山等降水量较大的山区,也是中国陡坡险坡主要分布地区。同时将坡度与多年平均单位面积水源涵养量进行叠加分析,制作散点图,进而分析水源涵养能力与坡度的关系(图 5)。水源涵养能力与坡度关系因不同坡度梯度而

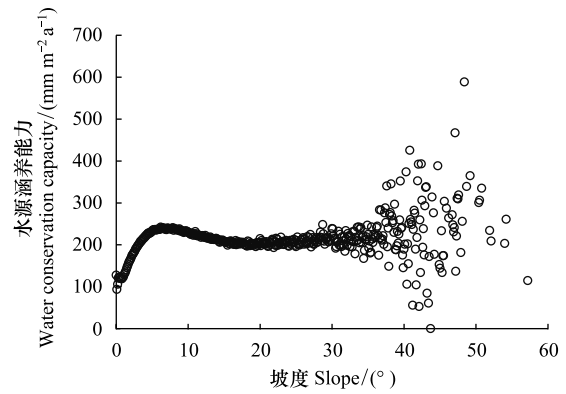


图 5 中国生态系统水源涵养能力与坡度的关系

Fig.5 Relationship between slope and water conservation capacity of ecosystems in China

不相同,其中 0°—5°坡度范围内生态系统水源涵养量随着坡度的升高而增大,且变化幅度较大;5°—35°坡度范围内生态系统水源涵养能力变化较小,相对稳定,生态系统水源涵养能力平均为 200 mm m⁻² a⁻¹; >35°坡度范围水源涵养能力呈散点状分布,且值域波动范围较大,生态系统水源涵养能力最小值和最大值均位于该坡度范围内,这是因为该坡度梯度内既有降水量大的南方山地丘陵区,又有降水量较少的西北干旱区。

表 3 不同坡度水源涵养量均值统计

Table 3 Mean values of water conservation capacity of different slope gradients

代码 Code	坡度分级 Slope classification/(°)	水源涵养能力 Water conservation capacity/ (mm m ⁻² a ⁻¹)	代码 Code	坡度分级 Slope classification	水源涵养能力 Water conservation capacity/ (mm m ⁻² a ⁻¹)
1	平坡 0—5	148.25	4	陡坡 26—35	212.26
2	缓坡 6—15	231.58	5	急坡 36—45	229.98
3	斜坡 16—25	203.39	6	险坡 ≥46	241.09

2.2 中国水源涵养服务时间尺度演变趋势

2.2.1 全国尺度

1990—2018 年,中国生态系统水源涵养总量在 1.35×10^{12} — 1.92×10^{12} m³/a 波动,平均为 1.54×10^{12} m³/a,水源涵养能力变化范围为 116.3—198.8 mm m⁻² a⁻¹,平均为 164.0 mm m⁻² a⁻¹。趋势分析结果表明,中国生态

系统水源涵养总量和水源涵养能力均呈显著线性降低态势(图6)。

2.2.2 分区尺度

1990—2018年,中国生态系统水源涵养服务平均为 $1.20 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$,以热带-亚热带季风区占主导,约占中国水源涵养总量的 77.9%,青藏高寒区次之,约占总量的 10.5%,随后是温带季风区,温带大陆气候区最低,仅约占水源涵养总量的 2.5%。与水源涵养总量不同,水源涵养能力从大到小排序依次为热带-亚热带季风区 > 温带季风区 > 青藏高寒区 > 温带大陆气候区,平均分别为 $483.7 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $82.5 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $63.9 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $14.2 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。回归分析表明,除温带大陆气候区 1990—2018 年生态系统水源涵养服务呈显著降低外,其余分区水源涵养服务均呈无显著规律的波动变化。各区生态系统水源涵养服务演变特征详见图 7。

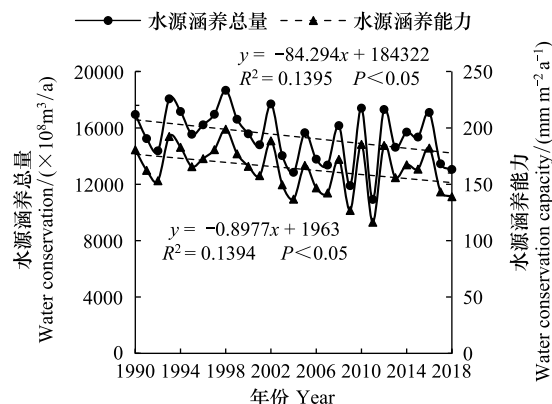


图6 1990—2018年中国生态系统水源涵养总量变化
Fig.6 The changes in ecosystem water conservation in China from 1990 to 2018

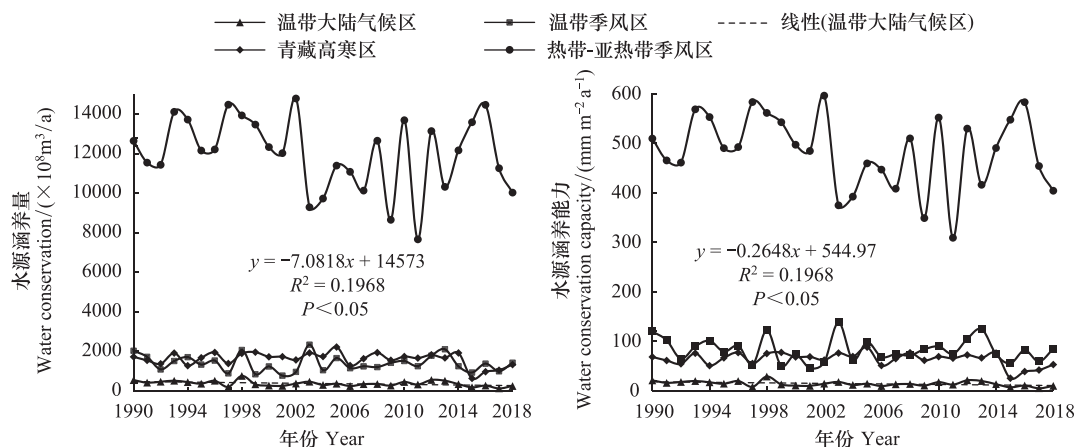


图7 各区水源涵养服务演变

Fig.7 Evolution of ecosystem water conservation of different zones

2.2.3 栅格尺度

1990—2018年,中国绝大部分栅格生态系统水源涵养服务变化不显著,平均约占中国陆地总面积的 84.0%,仅约 16.0%的栅格水源涵养发生显著变化,其中又以极显著降低和显著降低占主导,分别约占陆地总面积的 7.6%和 5.3%,二者之和约占显著变化栅格总数的 80.7%,主要分布于藏东南、川西滇北、滇中与滇西、冀东北与浑善达克沙地周边、天山东麓和台湾省。极显著升高或显著升高区域约占陆地总面积的 1.4%和 1.7%,它们主要分布青藏高寒区中东部地区、秦岭、三江平原和大兴安岭北部寒温带地区。1990—2018 年中国栅格尺度生态系统水源涵养演变特征详见图 8 和表 4。

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 水源涵养功能与格局

尽管中国生态系统水源涵养研究较多,但采用水量平衡法动态研究全国生态系统水源涵养服务的较少。

龚诗涵等研究发现,2010 年中国林地、灌丛、草地、园地和湿地水源涵养总量的 12224.33 亿 m^3 ,其中水源涵养量较高的区域主要集中在武夷山脉、南岭、武陵山区、大巴山区,四川盆地,其次为云贵高原量较高的区域,再次为长白山与大小兴安岭地带,蒙古高原、青藏高原以及新疆西北部的水源涵养量较低^[6]。Zhang 等利用 250 m 分辨率土地覆被数据研究发现,2010 年中国生态系统水源涵养空间格局为东高西低、南高北低,水源涵养总量为 12932.2 亿 m^3 ,平均为 $136.1 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[31]。本研究发现,1990—2018 年中国生态系统水源涵养分布格局为南高北低、东高西低,水源涵养总量平均为 15396.2 亿 m^3/a ,水源涵养能力平均为 $164.0 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。因此,水源涵养空间格局与前人研究完全一致,仅水源涵养功能大小略有差异。造成生态系统水源涵养服务差异主要有以下原因:(1)数据分辨率所致,本研究土地覆被数据的分辨率为 1km,而龚诗涵等^[6]土地覆被数据分辨率为 90 m,Zhang 等^[31]用到的土地覆被数据分辨率为 250 m,即本研究分辨率均低于龚诗涵等和 Zhang 等的数据分辨率,必将导致本研究植被系统面积小于 Zhang 等和龚诗涵等植被系统面积,而植被系统面积的增加必导致植被蒸散量的增加,进而导致水源涵养量的降低,这可能是本研究水源涵功能高于龚诗涵等和 Zhang 等的重要原因;(2)研究时段差异所致。龚诗涵等^[6]和 zhang 等^[31]的研究时段均为 2000—2010 年,而本研究的研究时段为 1990—2018 年。由于水源涵养数值与年降水量极显著相关,而中国降水量年际波动较大。(3)研究对象差异,龚诗涵等仅研究了一些植被系统,而本研究研究了所有生态系统。因此,剔除研究时段、研究对象和数据精度差异的影响,本研究结果与前人研究结果相符。就不同植被水源涵养量而言,本研究结果与龚诗涵等^[6]研究结果基本一致,如都是常绿阔叶林>常绿针叶林>针阔混交林>落叶阔叶林>落叶针叶林,且不同森林类型水源涵养能力也与之结果较接近,园地水源涵养能力($490.1 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)略大于龚诗涵等研究结果($467.9 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和混交林水源涵养能力分别为 $607.7 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $439.4 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $147.2 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $380.3 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,森林水源涵养能力小于刘业轩等福建研究结果(分别约为 $660 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $610 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $600 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $560 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[15],却大于余新晓等北京森林平均水源涵养量($75 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[32]、薛健等祁连山森林平均水源涵养量($102.1 \text{ mm m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)等研究结果^[17],这主要由研究区域年降水量差异所致。

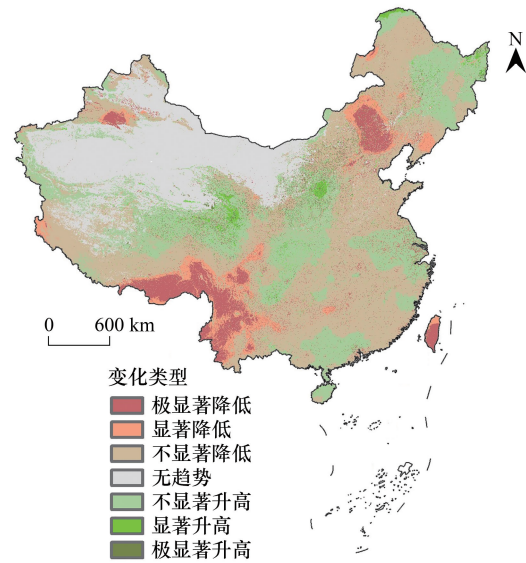


图 8 1990—2018 年中国生态系统水源涵养服务演变特征
Fig.8 The evolution characteristics of water conservation service in China's ecosystems from 1990 to 2018

表 4 1990—2018 年栅格尺度中国生态系统水源涵养演变汇总

Table 4 Evolution of ecosystem water conservation in Chinese ecosystems at grid scale from 1990 to 2018

变化类型 Variation types	面积百分比 Area percentage/%	变化类型 Variation types	面积百分比 Area percentage/%
极显著降低 Extreme decrease	7.61	不显著升高 No significant increase	23.63
显著降低 Significant decrease	5.30	显著升高 Significant increase	1.37
不显著降低 No significant decrease	37.32	极显著升高 Extreme increase	1.72
无趋势 No noticeable trend	23.06	合计 Total	100.00

3.1.2 水源涵养演变趋势

关于中国水源涵养功能演变的研究,主要在区域/流域尺度开展几期水源涵养变化研究,缺乏栅格尺度水

源涵养功能长时间系列的动态演变研究。本研究发现,1990—2018年,约16.0%中国陆地栅格水源涵养功能发生显著变化,其中主要为极显著或显著降低,约占显著变化区域面积的80.7%,主要分布于藏东南、川西滇北、滇中、滇西、冀东北与浑善达克沙地周边、天山东麓和台湾省;仅约19.3%的显著变化区域为极显著或显著升高,它们主要零星分布青藏高原中东部地区、河套平原、秦岭和东北平原等地区。中国已有不少区域/流域水源涵养下降的报道,如1960—2020年川西亚高山区域水源涵养功能在以2.83 mm/a的速率下降^[33];2001—2015年祁连山上游黑河流域水源涵养服务以7.6 mm/a的速度递减^[18];1980—2005年三江源地区水源涵养功能整体呈下降态势^[34];2000—2010年陕北黄土高原大部分区域水源涵养服务有不同程度下降,其中以中部地区下降的尤为显著^[25]。

本研究发现,川西滇北地区水源涵养功能极显著降低,祁连山黑河上游地区大部分区域有不同程度下降,黄土高原和三江源地区大部分区域水源涵养有不同程度增加,这与川西亚高山区域和祁连山上游黑河流域水源涵养呈下降态势的报道空间上完全吻合,而与三江源区和陕北黄土高原水源涵养降低的报告不符,其原因主要有:(1)研究时段差异所致,本研究时段为1990—2018年,三江源区和陕北黄土高原区研究时段分别为1980—2005年和2000—2010年。研究时段的不同必然导致主要受降雨影响的水源涵养功能变化的差异;(2)数据差异,本研究用到的是中科院遥感所解译的1 km土地覆被栅格数据,陕北黄土高原区域研究土地利用分辨率为30 m,三江源区研究用的是中国科学院地理科学与资源研究所刘纪元团队解译的1 km土地利用数据,数据源和数据精度均有差异;(3)研究方法差异,本研究方法是基于线性拟合做出的趋势判定,而三江源区和陕北黄土高原区的研究结果是根据不同时期差值判定获得。

中国也有不少区域水源涵养功能增强的报道,如张彪等发现2000—2018年京津风沙源治理工程区的水源涵养服务有所增强^[35];薛健等发现1980—2017年祁连山水源涵养呈上升趋势^[17];宁亚洲等得出2000—2015年秦岭水源涵养服务以0.26 mm/a的速度增加^[36]。本研究发现,秦岭地区和祁连山南部生态系统水源涵养有不同程度的增加,且不少栅格增加达极显著或显著水平,而浑善达克山地周边极显著或显著降低。本研究结果与李亚洲等和薛健等研究结果较一致,而与张彪等研究结果不同,研究结果差异主要由以下三方面原因所致:(1)研究时段差异,本研究和张彪等研究时段分别为1990—2018年和2000—2018年,相差了10年数据;(2)数据差异,本研究1 km土地覆被数据来自中国科学院遥感所遥感解译,而张彪等用的是中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心30 m土地覆被数据,数据源及数据精度均存在差异;(3)蒸散发的计量方法。本研究采用彭曼公式计算潜在蒸散量,再根据植被蒸散系数计算实际蒸散量,而张彪等根据评估区温度计算最大蒸散量,再引入土地覆被调整系数获得蒸散发,实际蒸散发计量方法不同。

3.2 结论

基于水量平衡模型,从全国、分区和栅格三个尺度对中国1990—2018年生态系统水源涵养格局与演变展开研究,得出以下主要结论:

(1)中国生态系统水源涵养整体呈南高北低、东高西低的分布格局。水源涵养总量及水源涵养能力均呈显著下降态势,平均分别为15396.2 亿 m^3/a 和164.0 $\text{mm m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。水源涵养能力在植被类型、海拔梯度和坡度梯度间差异显著,分别以常绿阔叶林、<1000 m的低海拔和>45°陡坡最高。

(2)中国生态系统水源涵养及其能力均以热带-亚热带季风区最高,温带大陆气候区最低,分别约提供了中国水源涵养总量的77.9%和2.5%。除温带大陆气候区水源涵养服务显著降低外,其余分区水源涵养服务在近30年间变化不显著。

(3)84.0%的中国陆地栅格水源涵养变化不显著,仅约16.0%陆地栅格水源涵养变化显著,主要为极显著降低和显著降低类型,分别约显著变化栅格总数的47.6%和33.1%,主要分布于藏东南、川西滇北、滇中西、冀东北、浑善达克沙地、天山东麓和台湾省;极显著或显著增加的栅格约占显著变化总量的19.3%,主要分布于青藏高原中东部、秦岭、三江平原和大兴安岭寒温带地区。本研究将为中国生态系统水源涵养服务保护与调控区域遴选提供支撑。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, den Belt M v. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997. 387(6630): 253-260.
- [2] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2011. 92(10): 2403-2409.
- [3] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999. 10(5): 635-640.
- [4] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015. 37(9): 1740-1746.
- [5] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009. 24(6): 571-576.
- [6] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖隼, 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.
- [7] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 栾晓峰. 三江源地区生态系统水源涵养功能分析及其价值评估. *长江流域资源与环境*, 2006. 15(3): 405-408.
- [8] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. *生态学报*, 2018. 38(5): 1679-1686.
- [9] Cong W, Sun X. Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. *Ecological Indicators*, 2020. 112: 106089.
- [10] Núñez D, Nahuelhual L, Oyazún C. Forests and water: the value of native temperate forests in supplying water for human consumption. *Ecological Economics*, 2006. 58(3): 606-616.
- [11] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究. *植物生态学报*, 2003. 27(1): 16-22.
- [12] 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. 28(3): 529-534.
- [13] 姜志林. 森林生态学(六): 森林生态系统蓄水保土的功能(2). *生态学杂志*, 1985. 4(2): 59-63.
- [14] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 王晓学. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价. *生态学报*, 2011. 31(17): 5009-5016.
- [15] 刘业轩, 石晓丽, 史文娇. 福建省森林生态系统水源涵养服务评估: InVEST 模型与 meta 分析对比. *生态学报*, 2021. 41(4): 1349-1361.
- [16] 程唱, 贺康宁, 俞国峰, 柴世秀. 干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究. *生态学报*, 2021. 41(5): 1979-1990.
- [17] 薛健, 李宗省, 冯起, 缪驰远, 邓晓红, 狄振华, 叶爱中, 龚伟, 张百娟, 桂娟. 1980—2017 年祁连山水源涵养量时空变化特征. *冰川冻土*, 2022. 44(1): 1-13.
- [18] 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.
- [19] 吕乐婷, 任甜甜, 孙才志, 郑德凤, 王辉. 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. *生态学报*, 2020. 40(3): 993-1003.
- [20] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 戴尔阜. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响. *地理研究*, 2016. 35(1): 49-57.
- [21] 谢家泽, 陈志恺. 中国水资源. *地理学报*, 1990. 45(2): 210-219.
- [22] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 甄霖. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究. *生态学报*, 2019. 39(16): 5847-5856.
- [23] Xu J, Xie G, Xiao Y, Li N, Yu F, Pei S, Jiang Y. Dynamic analysis of ecological environment quality combined with water conservation changes in national key ecological function areas in China. *Sustainability*, 2018. 10(4): 1202.
- [24] Allen R G. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Rome: FAO. 1998.
- [25] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 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*, 2016. 35(4): 664-676.
- [26] 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.
- [27] 游松财, 邸苏闯, 袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算. *自然资源学报*, 2009. 24(3): 545-552.
- [28] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京农业大学, 2003.
- [29] 刘小媛. 基于资源环境承载力评价视角下的县域国土空间规划路径探索[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- [30] 程维明, 周成虎, 李炳元, 申元村. 中国地貌区划理论与分区体系研究. *地理学报*, 2019. 74(5): 839-856.
- [31] Zhang L, Xiao Y, Zheng H, Xu W, Lu F, Rao E, Jiang L, Xiao Y, Wu B, Zeng Y, Ouyang Z. Ecosystem services dataset of China (2010). 2017: Science Data Bank, 2017. <http://www.dx.doi.org/10.11922/sciencedb.458>. Retrieved 2021.7.8.
- [32] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. *林业科学*, 2012. 48(10): 1-5.
- [33] 汪璇, 邓丽梅, 刘刚才, 陆传豪, 董先勇, 朱万泽. 川西亚高山区域的水源涵养功能变化趋势. *水土保持通报*, 2022. 42(1): 303-307, 316-316.
- [34] 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.
- [35] 张彪, 王爽, 李庆旭, 谢高地. 京津风沙源治理工程区水源涵养功能时空变化分析. *生态学报*, 2021. 41(19): 7530-7541.
- [36] 宁亚洲, 张福平, 冯起, 魏永芬, 丁家宝, 张元. 秦岭水源涵养功能时空变化及其影响因素. *生态学杂志*, 2020. 39(9): 3080-3091.