

DOI: 10.5846/stxb201901030020

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与变化研究. 生态学报, 2019, 39(16): - .

Wang Y, Zhang C S, Liu C L, Zhen L. Research on the pattern and change of forest water conservation in Three-North Shelterbelt Forest Program region, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

# 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局与变化研究

王 耀<sup>1</sup>, 张昌顺<sup>2,3,\*</sup>, 刘春兰<sup>4</sup>, 甄霖<sup>2,3</sup>

1 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037

**摘要:**三北防护林体系水源涵养功能是三北地区生态环境状况的重要指示器,然而,三北防护林体系水源涵养研究仍较缺乏。动态评估三北防护林体系建设工程区(三北工程区)森林水源涵养功能及其影响因素,对科学认识、保护和调控三北防护林体系森林水源涵养,制定三北工程区植被建设与保护决策具有重要意义。以三北工程区森林为研究对象,通过收集和分析相关数据,在植被分区的基础上,分析三北工程区森林水源涵养时空格局与变化特征,对比研究各区不同森林类型水源涵养功能差异,揭示各区森林水源涵养功能与地形及森林状况与质量的定量关系。结果表明:(1)三北工程区森林水源涵养功能持续增强,单位面积水源涵养量从 1990 年的 73.92mm 增加到 2015 年的 75.14mm,空间格局呈东高西低、南高北低态势。(2)森林水源涵养功能在植被分区和森林类型间差异显著,森林植被区是三北工程区森林水源涵养的主体;针阔混交林是三北工程区水源涵养功能最强的森林类型。(3)三北工程区森林水源涵养受其地形、状况与质量的影响显著,除个别植被区外,各区森林水源涵养量随坡度、覆盖度和 NPP 增加而增大,随生物量增加而降低,这是区域植被适应及滥砍滥伐、毁林开垦、植被建设与保护等人干扰共同作用的结果。因此,可通过调整与优化林分结构,调控区域森林水源涵养功能。

**关键词:**三北防护林体系;林业生态工程;植被分区;水源涵养;格局与变化

## Research on the pattern and change of forest water conservation in Three-North Shelterbelt Forest Program region, China

WANG Yao<sup>1</sup>, ZHANG Changshun<sup>2,3,\*</sup>, LIU Chunlan<sup>4</sup>, ZHEN Lin<sup>2,3</sup>

1 Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

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

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

**Abstract:** Water conservation is an important component of forest ecosystem services, which is involved in the natural processes such as regional climate circulation, hydrologic cycle, vegetation growth and succession, and availability of soil nutrients. Thus it is an important indicator for regional eco-environment condition. Water resources in Three North Shelterbelt Forest Program region are scarce. Many researchers have attributed water scarcity in this area to large-scale artificial afforestation. Other studies have shown that climate change, the industrial development, intensive agricultural

**基金项目:**重点研发计划项目(2016YFC0503700,2016YFC0500204),中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-314-01);中国科学院特色研究所培育建设服务项目(TSYJS05)

**收稿日期:**2019-01-03; **网络出版日期:**2019-00-00

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

irrigation, and overdraft of groundwater were the primary causes of water resource changes. Whatever the reasons are, recent studies have shown that topography, stand condition and quality significantly influenced the regional forest water conservation. It is necessary to dynamically study the forest water conservation and its response to topography, forest condition and quality. This will be conducive to understand the achievements in ecological construction, to promote vegetation construction, and to regulate water conservation services of the Three-north Shelterbelt forest program. This study analyzed literature and applied GIS technology to analyze the hydrological characteristics of different forests, and to develop a method to dynamically assess water conservation services of different forests at a regional scale. We quantified the water conservation services of different forests in the Three North Shelterbelt Forest Program region comparing those services across different types of forests, years and vegetation zones. We also analyzed the respective effects of topography, forest condition and quality on the spatial patterns in forest water conservation services. The results were as follows: (1) the forest water conservation in Three North Shelterbelt Forest Program region has been continually enhanced. It increased from 73.92mm in 1990 to 75.14mm in 2015, and followed a decreasing trend from the east to the west, and from the south to the north. (2) There were significant differences in forest water conservation among different vegetation zones, years, and forests types. Forest vegetation zone was the main body of forest water conservation in the Three North Shelterbelt Forest Program region. The coniferous and broad-leaved mixed forest was the forest type with the highest forest water conservation. (3) The forest water conservation in the Three North Shelterbelt Forest Program region was affected by topography, forest condition, and quality respectively. Except for individual vegetation zone, the forest water conservation in vegetation zone was significantly increased with raised slope degree, vegetation coverage, and vegetation net primary productivity, while was decreased with forest biomass, which was the result of the comprehensive function of regional vegetation adaptation and human disturbance, such as excessive deforestation, destroying trees and reclamation, and vegetation construction and protection. Therefore, the regional forest water conservation can be regulated by adjusting and improving forest structure.

**Key Words:** Three-north Shelterbelt Forest Program; forestry ecological engineering; vegetation regionalization; water conservation; pattern and change

被誉为“世界生态工程之最”的三北防护林体系建设工程(以下简称“三北工程”),始于1979年,该工程从根本上改善中国“三北”地区生态环境和生产条件,1979—2018年三北工程累计完成造林保存面积3014.3万 $\text{hm}^2$ ,森林覆盖率由5.05%提高到13.57%;活立木蓄积量由7.2亿 $\text{m}^3$ 提高到33.3亿 $\text{m}^3$ ;是中国北疆抵御风沙、保持水土、护农促牧的绿色长城<sup>[1]</sup>。三北工程不仅具有重要的社会经济效益<sup>[2]</sup>,还在防风及降低风速、调节水热、改善小气候、提高作物产量<sup>[3,4]</sup>,保持水土、涵养水源、固碳释氧等方面发挥着重要的生态效益<sup>[5-7]</sup>,是全球生态治理的成功典范。然而,三北地区降水量不足、蒸发量过大。随着社会经济的快速发展,三北地区工农业用水量持续增长,而早期植被建设过程中忽略了水资源承载力,违背“适地适树、适树适生境”原则,重乔轻灌草,营造了大面积的高密度人工纯林,致使三北工程造林成活率低、成活不成林或成林不成材、生产力水平低、生长缓慢、停滞甚至枯死等衰退现象明显<sup>[8,9]</sup>。当前,三北地区生态依然脆弱,继续推进三北工程建设不仅有利于区域可持续发展,也有利于中华民族伟大复兴。因此,“以水定林、水量平衡”持续推进三北工程建设,不断提升林草资源总量和质量,持续改善三北地区生态环境,巩固和发展祖国北疆绿色生态屏障,为建设美丽中国作出新的更大贡献,成为三北工程亟待解决的科学问题。

森林生态系统是陆地生态系统中结构最复杂,功能最齐全的生态系统,作为森林生态系统服务重要方面,森林水源涵养功能成为林学、森林经营学、生态学、水文学等多学科交叉的研究热点。随着人们对森林水源涵养认识的不断拓展与更迭,森林水源涵养功能的内涵已发展成由水源供给、调节径流、水质净化等多种服务组成的整体<sup>[10,11]</sup>。关于三北工程水源涵养研究,国内已有报道,如朱金兆等<sup>[6]</sup>对三北工程水源涵养效益进行了较全面的总结。孙玉文等<sup>[12]</sup>对三北工程涵养水源效益进行核算,得出三北工程防护林体系年水源涵养价值

为 15.35 亿元人民币,单位面积森林年涵养水源价值 523.34 元/hm<sup>2</sup>。此外,还有一些区域尺度或样方尺度的三北防护林水源涵养功能研究,如周海涓<sup>[13]</sup>在对宁夏荒漠化治理综合效益研究中发现净化水质价值从 1975 年的 187808 万万元增加到 2013 年的 297168 万元,增长了 58.2%;王晓慧等得出山西中阳县三北工程水源涵养价值 13.1 亿元<sup>[14]</sup>;车克钧等<sup>[15]</sup>采用综合蓄水法对祁连山水源涵养林研究发现,青海云杉林是祁连山最佳涵养水源林。

虽然中国对三北防护林工程水源涵养功能开展了一些研究,但这些研究主要在区域尺度和样方尺度上开展,缺乏三北防护林体系建设工程整体动态评估的报道。基于此,本研究在植被分区的基础上,基于多年降水、风速、光照、平均温度、极温等气象数据,获取多年平均蒸散量、多年平均降水量等数据,利用水量平衡模型,研究三北工程区森林水源涵养时空格局与变化,比较研究森林水源涵养功能在不同时期、森林类型间及植被分区间的差异与变化,揭示各植被分区森林水源涵养功能与坡地、生物量、植被覆盖度、NPP 等因子的相互关系,旨在科学认识和保护三北防护林体系建设工程水源涵养,为三北工程区制定植被建设方案,调控森林水源涵养功能,缓解区域日趋严重的水资源供需矛盾,实现区域社会、经济和生态可持续发展等提供理论和数据支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地区与对象

三北防护林体系工程是中国林业发展史上的一大壮举,开创了我国林业生态工程建设的先河。地跨东北、华北北部和西北大部分地区,包括中国北方 13 个省(自治区、直辖市)的 107 个市(盟、州)745 个县(旗、市、区),建设范围东起黑龙江省的抚远县,西至新疆维吾尔自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县,东西长约 4500 公里,南北宽 560—1460 公里,总面积 449.37 万平方公里,占国土面积的 46.81%,接近中国的半壁河山。由于缺少三北工程区精准防护林空间分布数据,在此将三北工程区内的森林(包括乔木林、灌木林、园地和绿地)作物研究对象。

### 1.2 研究方法

三北工程区植被分区主要采用空间叠置法,综合该区域 2015 年土地覆被、多年平均降水量、地形地貌等空间数据进行植被分区划定。

水源涵养量主要通过水量平衡方程核算得到。水量平衡原理是指在一定的时空内,水分的运动保持着质量守恒,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。在此将森林生态系统视为一个“暗箱”,以水量的输入和输出为着眼点,基于水量平衡,降水量减去蒸散量以及其他消耗的差值即为水源涵养量<sup>[16]</sup>。

$$Q_{\text{Waterconservation}} = P_i - R_i - ET_i$$

式中  $Q_{\text{water conservation}}$  为各斑块年水源涵养量(mm);  $P_i$  为  $i$  斑块年降水量(mm);  $R_i$  为  $i$  斑块暴雨径流量(mm);  $ET_i$  为  $i$  斑块年蒸散发量(mm),  $ET$  采用 INVEST 模型进行核算,具体核算模型和参数详见文献<sup>[17,18]</sup>。

地表暴雨径流量采用以下模型进行核算<sup>[16]</sup>。

$$R = P \times \alpha$$



图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

式中, $R$  为地表径流量(mm); $P$  为年降水量(mm); $\alpha$  为平均地表径流系数。地表径流系数详见表 1。

表 1 各类型生态系统地表径流系数均值

Table 1 The average runoff coefficient for each forest type

一级类型 Primary types	二级森林类型 Secondary types	平均径流系数 Runoff coefficient
乔木林 Arboreal forest	落叶阔叶林	2.70
	常绿针叶林	4.52
	落叶针叶林	0.88
	针阔混交林	3.52
灌木林 Shrub	常绿阔叶灌丛	4.26
	落叶阔叶灌丛	4.17
	常绿针叶灌丛	4.17
	稀疏林	19.2
园地 Garden	稀疏灌丛	19.20
	乔木园地	9.57
绿地 Greenbelt	灌木园地	9.57
	乔木绿地	2.7
	灌木绿地	4.17

### 1.3 研究数据

土地覆被和 NPP 数据来自中国科学院遥感与数字地球研究所曾源团队。1990—2015 年日降水、风速、日照时数、平均气压、平均相对湿度、平均气温及极温等气象数据和气象局基于站点信息来自中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>), 后利用彭曼模型核算、插值后获得潜在蒸散量空间分布。数字高程 90mDEM, 来自国家地球系统科学数据共享服务平台 (<http://www.geodata.cn/index.html>) 等。主要数据来源及处理详见表 2。

表 2 主要数据来源

Table 2 Sources of principal data

数据名 Data name	数据类型 Data format	数据源 Data source	获取方式 Data acquisition ways
气象数据 Meteorological data	1990—2015 年 Excel	中国气象数据网	共享平台数据申请
土地覆被 Land cover	1990、2000、2010 和 2015 年 1km×1km 栅格数据	中国科学院遥感与数字地球研究所	项目数据共享
高程数据 Digital elevation model	90m×90m 栅格数据	国家地球系统科学数据共享服务平台	共享平台数据申请
三北工程区边界 Three north shelterbelt project boundary	1:100 万县域边界矢量数据	国家林业和草原局调查规划设计院	项目数据共享
根系深度 Root depth	文献数据	根据植被覆盖类型查阅相关文献 <sup>[18]</sup>	ArcMap 计算获得
植物可利用水 Plant available water	-	利用土壤质地计算获得 <sup>[18]</sup>	ArcMap 计算获得
植被系数 Vegetation coefficient	-	根据叶面积指数计算 <sup>[18]</sup>	ArcMap 计算获得
土壤数据 Soil data	Excel 土壤调查数据	中国科学院资源环境科学数据中心	共享平台数据申请
生物量	1km×1km 栅格数据	成果积累 <sup>[19]</sup>	-
NDVI	1km×1km 栅格数据	中国科学院资源环境科学数据中心	共享平台数据申请
NPP	1km×1km 栅格数据	中国科学院遥感与数字地球研究所	项目数据共享

## 1.4 数据分析

本文基于三北防护林体系建设工程区植被分区研究,利用 ArcMap 中的 Spatial Analyst Tools 中 Zonal Statistics as Table 模块,获取 1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年四期不同森林类型单位面积水源涵养量,揭示三北工程区不同森林类型水源涵养功能时空变异特征。之后再利用 Zonal Statistics as Table 模块,结合水源涵养、土地覆被、植被分区、坡度、植被覆盖度、生物量和 NPP 等数据,分别获取 2015 年各植被分区不同森林类型平均水源涵养量、以及各植被分区中不同单位面积森林水源涵养量对应的平均生物量、平均 NPP、平均植被覆盖度和平均坡度,最后用 SPSS 进行回归分析,并用 Excel 软件趋势线拟合制图,揭示三北工程区各区森林水源涵养功能与地形及森林状况与质量的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 三北工程区植被分区

依据区域年降水量和植被空间异质性,结合地形地貌特征,将三北工程区植被分成森林植被区、稀树灌草区、草原植被区、荒漠植被区和高原植被区。其中森林植被区位于三北工程区东部和东南部,范围包括东北、华北以及黄土高原东南部,达 120.95 万  $\text{km}^2$ ,约占工程总面积的 26.9%,主导自然生态系统为森林;稀树灌草区位于乔木植被向草地植被过渡区域,包括内蒙古东南部、河北北部和黄土高原中部区域以及新疆西部天山地区,面积达 59.32 万  $\text{km}^2$ ,约占总量的 13.2%,主导自然生态系统为灌草丛;草原植被区分布于半干旱区,主要位于内蒙古中部以及准噶尔盆地西部边缘及阿尔泰山南麓地区,约 69.38 万  $\text{km}^2$ ,自然生态系统主要为草地;荒漠植被区面积最大,约 127.62 万  $\text{km}^2$ ,主要分布于内蒙古西部的荒漠和戈壁区域、新疆的塔里木盆地以及古尔班通古特沙漠等干旱地区,自然生态系统主要为荒漠;约占区域总面积 16.0% 的高原植被区位于青藏高原北麓,该区植被类型丰富多样,具有典型高原植被特征(图 2 和表 3)。

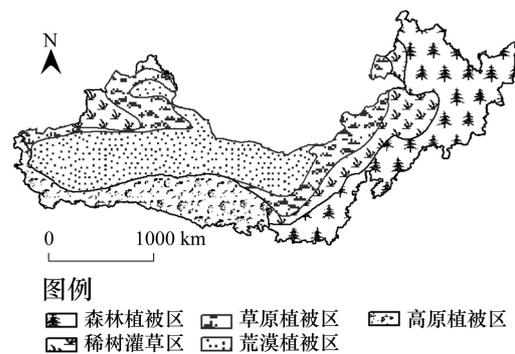


图 2 三北工程区植被分区

Fig.2 Vegetation regionalization in the Three North Shelterbelt Forest Program region

表 3 三北工程区植被分区特征

Table 3 Characteristics of vegetation zone in the Three North Shelterbelt Forest Program region

类型 Types	面积 Area/ $10^4 \text{ km}^2$	比例 Percentage/%	主导自然生态系统
森林植被区 Forest vegetation zone	120.95	26.92	森林
稀树灌草区 Sparse shrub vegetation zone	59.32	13.20	灌草丛
草原植被区 Grassland vegetation zone	69.38	15.44	草地
荒漠植被区 Desert vegetation zone	127.62	28.40	荒漠
高原植被区 Plateau vegetation zone	72.10	16.04	高原植被
合计 Total	449.37	100.00	-

### 2.2 水源涵养功能格局与变化

因年降水量极显著影响区域森林年水源涵养量,为消除气候波动对区域森林水源涵养的影响,客观评价三北工程区生态建设对区域森林水源涵养的影响,本研究开展基于多年平均潜在蒸散量和平均降水量的森林水源涵养研究。结果表明,三北工程区森林水源涵养量整体呈现东高西低、南高北低的分布格局,其中以辽宁东北部和吉林东南部的边境地区最高,单位面积水源涵养量大于 200mm,其次为辽宁省东北部、吉林省东部、黑龙江省中东部及北部边境地区,平均为 100—200mm,随后是辽宁省中部、黑龙江东北部和西北部、黄土高

原北麓以及祁连山等地区,平均为 50—100mm,荒漠植被区最低,年水源涵养量均<20mm(图 3)。因采用多年平均气象数据进行核算,该区域 1990—2015 年森林总量变化不大,致使三北工程区森林水源涵养量空间格局年际变化不显著,但三北工程区单位面积森林年水源涵养量呈持续增加,从 1990 年的 73.92mm 增加到 2015 年的 75.14mm,而 1990 年三北工程区森林水源涵养总量(497.35 亿  $m^3$ )却高于 2000 年水源涵养总量(493.77 亿  $m^3$ )。2000 年后,随着退耕还林还草工程、天然林保护等工程的推进,该区域森林水源涵养总量持续增加,2015 年达 497.72 亿  $m^3$ (表 3)。

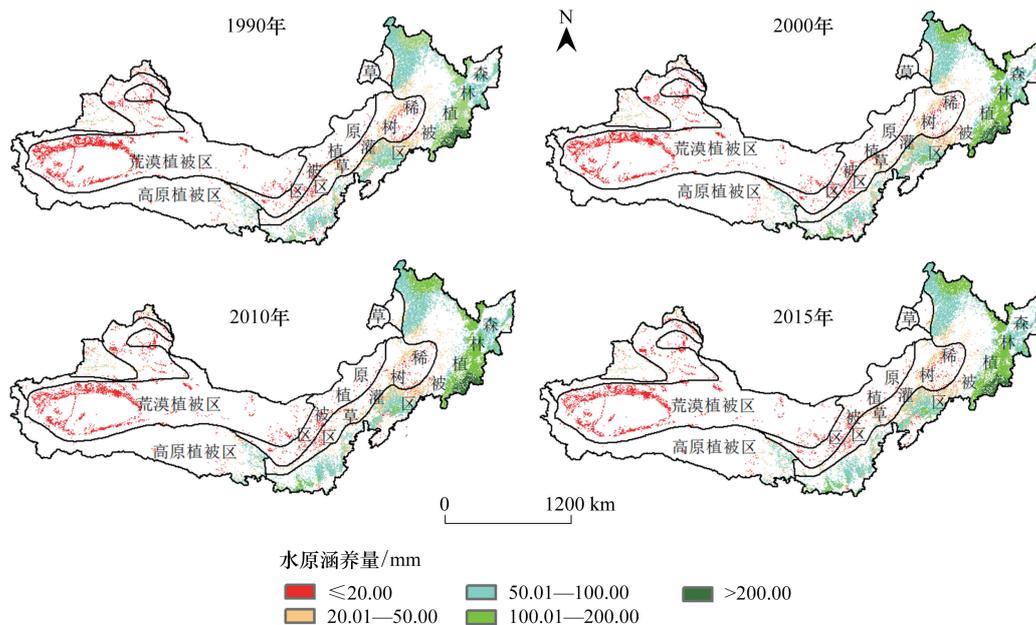


图 3 基于多年平均气象数据核算的水源涵养功能

Fig.3 Patterns of water conservation depth based on multi-year average weather data

就森林类型水源涵养功能而言,该区域森林水源涵养功能以针阔混交林最强,平均为 113.3mm,常绿阔叶灌丛次之,为 102.58mm,随后是落叶针叶林和落叶阔叶林,分别为 94.02mm 和 92.92mm,稀疏灌丛最低,平均为 0.02mm。除乔木和灌木园地单位面积水源涵养量降低外,其余森林类型单位面积水源涵养量呈波动增加态势,这是区域经济林发展、植被分布和生态建设与保护政策等综合作用的结果(表 4)。

表 4 各期不同植被类型水源涵养功能变化/mm

Table 4 The variations in water conservation of different forests

项目 Items	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	平均 Average
多年平均降水量 Annual precipitation /mm	326.49	326.49	326.49	326.49	326.49
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	93.04	93.13	92.78	92.74	92.92
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest	51.04	51.05	51.70	51.49	51.32
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	94.09	94.00	94.09	93.90	94.02
针阔混交林 Broadleaf and needleleaf mixed forest	113.22	113.26	113.46	113.40	113.34
常绿阔叶灌丛 Evergreen broadleaf shrubland	112.83	112.83	91.67	93.00	102.58
落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrubland	60.38	59.45	61.77	61.18	60.69
常绿针叶灌丛 Evergreen needleleaf shrubland	25.50	26.56	25.99	25.53	25.89
稀疏林 Sparse forest	2.10	2.20	2.71	2.76	2.44
稀疏灌丛 Sparse shrubland	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
乔木园地 Tree orchard	9.26	9.14	6.37	6.09	7.72
灌木园地 Shrub orchard	11.37	9.72	3.20	3.38	6.92

续表

项目 Items	1990 年	2000 年	2010 年	2015 年	平均 Average
乔木绿地 Tree garden	13.63	22.11	24.77	27.61	22.03
灌木绿地 Shrub garden	21.94	31.68	31.13	32.27	29.26
森林总面积 Total forest area/ $10^4 \text{hm}^2$	6728.22	6651.00	6628.35	6623.90	6657.87
水源涵养量 Water conservation /mm	73.92	74.24	74.99	75.14	74.57
水源涵养总量 Total water conservation / $10^8 \text{m}^3$	497.35	493.77	497.06	497.72	496.48

由于各植被区间降雨、地形地貌和植被类型等差异显著,致使各植被区森林水源涵养功能差异显著。2015 年三北工程区各植被分区不同森林类型单位面积水源涵养量一般表现为森林植被区>稀树灌草区>高原植被区>草原植被区>荒漠植被区,但常绿针叶灌丛以稀树灌草区最高,森林植被区次之,随后是草原植被区,荒漠植被区最低;高原植被区落叶阔叶灌丛、灌木园地和灌木绿地单位面积水源涵养量仅次于森林植被区,且落叶阔叶灌丛是该院植被区主要林分类型,致使各植被分区单位面积森林平均水源涵养量排序为森林植被区>高原植被区>稀树灌草区>草原植被区>荒漠植被区,分别为 97.98mm、55.19mm、28.44mm、6.32mm 和 0.06mm。森林植被区森林是三北工程区森林水源涵养功能的主体,其 2015 年水源涵养总量为 469.11 亿  $\text{m}^3$ ,约占工程区森林水源涵养总量的 94.25%(表 5)。

表 5 2015 年分区各森林类型水源涵养格局/mm

Table 5 The water conservation function of different forests in 2015 year

项目 Items	荒漠植被区 Desert area	草原植被区 Grassland area	稀树灌草区 Sparse shrub area	森林植被区 Forest area	高原植被区 Plateau area
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	0.01	3.75	25.32	100.94	24.20
常绿针叶林 Evergreen needleleaf forest	0.42	13.45	31.32	75.10	26.78
落叶针叶林 Deciduous needleleaf forest	8.09	17.65	56.71	96.91	-
针阔混交林 Broadleaf and needleleaf mixed forest	-	-	36.54	114.08	32.81
常绿阔叶灌丛 Evergreen broadleaf shrubland	-	-	-	93.00	-
落叶阔叶灌丛 Deciduous broadleaf shrubland	0.13	8.38	32.01	91.06	62.99
常绿针叶灌丛 Evergreen needleleaf shrubland	3.48	29.97	82.49	78.78	5.61
稀疏林 Sparse forest	0.00	0.00	0.18	23.45	-
稀疏灌丛 Sparse shrubland	0.00	0.00	0.00	1.50	0.00
乔木园地 Tree orchard	0.00	0.00	0.00	10.81	0.00
灌木园地 Shrub orchard	0.00	0.00	8.54	27.27	16.17
乔木绿地 Tree garden	0.00	2.00	13.42	49.89	2.70
灌木绿地 Shrub garden	0.00	5.09	29.04	84.76	43.33
水源涵养量 Water conservation /mm	0.07	6.32	28.44	97.98	55.19
水源涵养总量 Total water conservation / $10^8 \text{m}^3$	0.06	1.78	14.98	469.11	11.79

### 2.3 水源涵养格局与地形和、森林状况与质量的关系

不同植被分区单位面积森林水源涵养量与其平均生物量、平均 NPP、平均植被覆盖度和平均坡度相关分析结果表明,除荒漠植被区水源涵养量与坡度相关性不显著外,各植被区单位面积水源涵养量与坡度、生物量、NPP 和植被覆盖度之间存在极显著或显著的相关关系,且相关系数均以森林植被区最高。所有植被区单位面积森林水源涵养量随植被覆盖度增加而增加;除荒漠植被区单位面积森林水源涵养量与平均坡度相关性不显著,与平均 NPP 显著负相关外,其余植被分区单位面积森林水源涵养量随平均坡度和平均 NPP 的增加而显著增加;与森林平均生物量的关系较复杂,其中森林植被区单位面积森林水源涵养量随平均生物量的增加而显著增加,荒漠植被区和高原植被区则随生物量增加而线性降低,而稀树灌草区和草原植被区则表现为随生物量增加而降低,最终趋于各自的固定值(图 4)。水源涵养与坡度、森林状况与质量的上述关系产生的



共同作用的结果。三北工程区森林水源涵养功能因植被区和森林类型而异,单位面积森林水源涵养量以森林植被区最高,高原植被区次之,荒漠植被区最低,森林植被区森林是三北工程区森林水源涵养的主体;就森林类型而言,森林水源涵养功能以针阔混交林最高,草绿阔叶灌丛次之,稀疏灌丛最低,单位面积年均水源涵养量分别为 113.34mm、102.58 和 0.02mm。

(3)三北工程区各植被区森林水源涵养量与地形、森林状况与质量等显著相关,是区域植被长期进化及滥砍滥伐、毁林开垦和植被建设与保护等人类干扰共同作用的结果。在今后三北工程防护林建设与保护中,可通过调整与优化林分结构调控区域森林水源涵养功能。

## 3.2 讨论

### 3.2.1 与以往水源涵养功能研究对比

虽然中国已有关于三北工程区森林水源涵养功能评估的报道,但这些报道主要基于监测数据而展开的,也有不少利用水量平衡模型开展局部区域森林水源涵养国内研究,如丁程锋等用 INVEST 模型研究发现,天山中部云杉天然林水源涵养量平均为 54.25mm<sup>[20]</sup>。杨金明得到 2007 年和 2008 年黑龙江新林区单位面积寒温带山地针叶林年水源涵养量分别为 132.04 mm 和 166.74mm<sup>[21]</sup>;余新晓等发现北京山区森林年水源涵养量为 47.61—148.77mm,平均为 75mm,以落叶针叶林最高,平均为 148.77mm<sup>[22]</sup>。李盈盈等研究表明,陕西子午岭国家级自然保护区森林和灌丛的水源涵养能力最强,平均为 73mm<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,三北工程区森林单位面积年水源涵养量变化范围为 0—381mm,平均为 74.57mm,以针阔混交林最高,平均为 113.34mm,常绿阔叶灌丛次之,平均为 102.58mm。虽然本研究结果与前人研究结果存在一定的差异,但考虑到研究区域、研究时段和研究对象等方面差异,本研究结果与前人研究结果是一致的。

### 3.2.2 水源涵养功能变化分析

本研究发现 1990—2015 年三北工程区单位面积森林水源涵养量呈持续增加态势,而水源涵养总量却呈先减后增态势,其原因应与区域滥砍滥伐、毁林开垦、林业生态建设工程、年降水量与造林成活率的关系等密切相关。2000 年以前,虽然三北工程区营造了大面积的防护林,但由于该区域滥砍滥伐、毁林开垦严重,大面积的天然林被采伐、破坏。2000 年以来,国家相继实施了天然林保护、生态公益林保护和退耕还林还草等生态建设与保护工程,滥砍滥伐、毁林开垦得到有效遏制,区域林地面积不断增加,森林质量不断提升,致使三北工程区森林单位面积水源涵养量和水源涵养总量持续增加。

三北工程区森林水源涵养功能与地形及森林状态与质量的关系是植被自然选择和人为干扰共同作用的结果。由于建国后中国长期实行农业反哺工业的发展道路,大面积的天然林遭到采伐。同时,三北工程区还是滥砍滥伐、毁林开垦严重的地区之一,致使现存的森林主要分布于坡度较大、降雨量较大、交通不便的山区,这些区域森林的植被覆盖度、年降水量、NPP 和生物量均较高,水源涵养功能强,致使单位面积水源涵养量随坡度、植被覆盖度和 NPP 增大而增大。森林植被区森林水源涵养与森林生物量极显著相关,其余地区单位面积水源涵养功随林分生物量增加而降低也是这个原因,由于其他植被区生态环境远比森林植被区恶劣,森林自然分布本来就少,加之人为毁林开垦和滥砍滥伐,致使这些区域现存的森林主要为人工林,这种降水量少的地区森林生物量愈高,其年蒸散量愈大,年水源涵养量则愈少。

### 3.2.3 水源涵养功能影响因子分析

现有研究表明,除了气象因素外,地形和森林状况与质量显著影响着森林水源涵养功能。本研究发现,除荒漠植被区森林水源涵养与坡地相关性不显著外,三北工程区其余工程区森林水源涵养功能与坡度、NPP、植被盖度和生物量之间存在极显著或显著的相关关系。

关于森水源涵养与坡度的关系,丁程锋等发现天山中部云杉天然林水源涵养功能随坡度增加而降低<sup>[20]</sup>,对此,唐玉芝等也得出相似的结论——乌江流域森林水源涵养能力与坡度呈显著的负相关<sup>[24]</sup>。然而,张宏峰等却发现东江流域森林水源涵养功能随坡度增加而增大<sup>[25]</sup>,龚诗涵等在研究中国生态系统水源涵养是也得出水源涵养功能与坡度显著正相关的结论<sup>[16]</sup>。本研究结果与丁程锋等及唐玉芝等结果相反,却与张洪峰等

及龚诗涵等研究结果一致。上述结果说明森林水源涵养功能与坡度的关系,不仅与研究对象有关,还可能与研究尺度、研究区降雨分布和人类干扰等相关。由于人为干扰空前,致使现存的森林大多分布于坡度较大的山区,因此,较大尺度研究时一般表现为坡度愈大森林,其水源涵养功能愈强。但当研究尺度较小时,坡度对降雨的影响就远小于坡度对地表径流的影响,致使小尺度时森林水源涵养功能随坡度增大而降低。

由于生物量、NPP、植被覆盖度显著影响着森林蒸散量,进而对森林水源涵养功能有显著影响。一般林分植被盖度愈高,其生物量和 NPP 愈大,年蒸散量也愈高,致使林分水源涵养量愈低,即其他条件相同情况下,森林水源涵养功能与森林生物量、NPP 和植被覆盖度等森林状况与质量负相关。然而,由于其他条件无法完全一致,年降雨量极显著决定了区域森林水源涵养量,在气候驱动和人为干扰共同作用下,年降水量愈高的森林,其植被覆盖度、NPP 和生物量也一般更高,致使全国或区域尺度森林水源涵养量与森林植被覆盖度、NPP 和生物量呈显著相关。这样类似的结论已有报道,如甘小莉等发现祁连山水源涵养最大的区域植被覆盖度较高<sup>[26]</sup>;丁程锋等得出天山中部云杉天然林水源涵养功能随云杉林覆盖率的增大而增加<sup>[20]</sup>。黄枝英得出北京典型森林水源涵养功能与生物量、郁闭度显著正相关<sup>[27]</sup>。关于森林水源涵养与 NPP 的关系研究的较少。但研究表明,NPP 与植被蒸散量之间存在显著的正相关关系<sup>[28, 29]</sup>,而蒸散量显著影响森林水源涵养量,说明植被 NPP 与森林水源涵养功能之间关系密切。总之,森林状况与质量显著影响着森林水源涵养功能<sup>[30, 31]</sup>,这一结论与本研究结果基本吻合,说明可以通过调整林分结构,提高林分质量调控三北防护林体系工程区森林水源涵养功能。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈婉.《三北防护林体系建设 40 年综合评价报告》发布 三大效益有机结合 生态效应显著. 环境经济, 2019, (241): 34-37.
- [ 2 ] 杨田. 陕西省三北防护林工程综合效益评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [ 3 ] Torita H, Satou H. Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(3-4): 186-194.
- [ 4 ] Ryszkowski L, Kędziora A. Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. *Ecological Engineering*, 2007, 29(4): 388-400.
- [ 5 ] 姜凤岐, 于占源, 曾德慧, 朱教君. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1702-1705.
- [ 6 ] 朱金兆, 周心澄, 胡建忠. 对“三北”防护林体系工程的思考与展望. *自然资源学报*, 2004, 19(1): 79-85.
- [ 7 ] 黄麟, 祝萍, 肖桐, 曹巍, 巩国丽. 近 35 年三北防护林体系建设工程的防风固沙效应. *地理科学*, 2018, 38(4): 600-609.
- [ 8 ] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 裴亮. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析. *地理学报*, 2012, 67(5): 589-598.
- [ 9 ] 宋立宁, 朱教君, 闫巧玲. 防护林衰退研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1684-1690.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. *生态学报*, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [ 12 ] 孙玉文, 邹乐贵, 李实, 王培华. 三北防护林体系涵养水源效益计量的研究. *林业勘查设计*, 1999, (3): 38-40.
- [ 13 ] 朱海娟. 宁夏荒漠化治理综合效益评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [ 14 ] 王晓慧, 陈永富, 陈尔学, 张元应, 雒艳兰. 基于遥感和 GIS 的三北防护林工程生态效益评价研究——以山西省中阳县为例. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 171-175.
- [ 15 ] 车克钧, 傅辉恩, 贺红元. 祁连山水源涵养林效益的研究. *林业科学*, 1992, 28(6): 544-548.
- [ 16 ] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖懿, 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.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] Li N, Xie G, Zhang C, Xiao Y, Zhang B, Chen W, Sun Y, Wang S. Biomass resources distribution in the terrestrial ecosystem of China. *Sustainability*, 2015, 7(7): 8548-8564.
- [ 20 ] 丁程锋, 张绘芳, 李霞, 李伟涛, 高亚琪. 天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例. *生态学报*, 2017, 37(11): 3733-3743.
- [ 21 ] 杨金明. 基于分布式水文模型的森林水源涵养功能评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [ 22 ] 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.

- [23] 李盈盈, 刘康, 胡胜, 吴磊. 陕西省子午岭生态功能区水源涵养能力研究. 干旱区地理, 2015, 38(3): 636-642.
- [24] 唐玉芝, 邵全琴. 乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 987-999.
- [25] 张宏锋, 袁素芬. 东江流域森林水源涵养功能空间格局评价. 生态学报, 2016, 36(24): 8120-8127.
- [26] 甘小莉, 孙德泉, 张林波, 贾庆堂. 自然因素对祁连山水源涵养能力影响研究. 安徽农业科学, 2012, 40(4): 2186-2188.
- [27] 黄枝英. 北京山区典型林分水分循环与水量平衡研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [28] 王娟, 何慧娟, 卓静, 董金芳. 基于 MODIS 数据的陕西省植被净初级生产力与实际蒸散的变化关系分析. 水土保持通报, 2017, 37(3): 264-269.
- [29] 王钊, 李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [30] 蒋桂娟, 郑小贤, 宁杨翠. 林分结构与水源涵养功能耦合关系研究——以北京八达岭林场为例. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 175-179.
- [31] 孟楚, 王琦, 郑小贤. 北京八达岭林场水源涵养林结构与功能耦合机理研究. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 69-72.