

张家口市林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系

王世清¹, 冀正欣¹, 卢龙辉³, 段亚明¹, 许月卿^{1,2*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193;
3. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京 100094)

摘要: 水源涵养功能是林地最重要的生态功能之一, 特别是在干旱、半干旱脆弱山区, 对维持区域生态安全和社会经济发展具有重要作用, 进行林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系研究可为林地规划和生态建设提供科学参考。该研究以河北省张家口市为例, 基于遥感影像数据、气象数据、森林资源清查数据等, 运用 GIS 技术、InVEST 模型和 SPSS 模型系统分析了张家口市林地和水源涵养功能的时空演变特征及其相互关系。研究表明: 1) 张家口市林地分布具有明显的空间集聚特征, 研究期内林地面积持续增加。阔叶林所占面积最大, 灌木增速最快, 针叶林分布面积最小且增速最慢。2) 1990—2020 年研究区水源涵养功能呈东部及南部高, 中部及西部低的空间分布格局, 平均水源涵养量先减少后增加再减少。3) 研究期内张家口市林地面积与水源涵养功能的空间分布具有一致性。随林地面积增加, 水源涵养量呈先增加后减少的趋势, 当林地面积达到区域总面积的 1/2 时, 水源涵养量达到峰值。不同树种结构的水源涵养量排序从大到小依次为阔叶林、针叶林、灌木。未来张家口市应合理规划经济林与其他树种的种植面积及格局分布, 同时注重混交林与原生林的种植, 丰富树种多样性, 从而充分发挥林地水源涵养功能, 促进张家口市生态建设和保护。

关键词: 生态; 林地; 生态系统服务; 水源涵养功能; 时空分异; 张家口市

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301027

中图分类号: S285

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)10-0131-10

王世清, 冀正欣, 卢龙辉, 等. 张家口市林地与水源涵养功能时空变化及其耦合关系[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 131-140. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301027 <http://www.tcsae.org>

WANG Shiqing, JI Zhengxin, LU Longhui, et al. Spatiotemporal changes and coupling relationship between forestland and water conservation function in Zhangjiakou City of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(10): 131-140. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202301027 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着社会经济的快速发展, 生态环境不断恶化, 水资源短缺、极端干旱事件的影响日益增强, 林地提供的水源涵养功能与社会需求的水源涵养服务不一致的矛盾不断突出^[1]。因此, 自 20 世纪 70 年代起, 中国陆续实施了一系列生态建设工程, 林地面积持续增加, 生态环境质量得到明显改善。但持续增加的林地面积是否引起生态系统服务功能的持续发挥成为学术界关注的热点问题。部分学者认为不是森林越多其所提供的生态系统服务功能就越强, 由于多种功能之间存在权衡关系, 功能变化也往往是非线性的, 因此功能存在最优区间及对应阈值^[2-3]。水源涵养功能是林地最重要的生态功能之一, 在调节水循环、改善水文状况及维持生态系统平衡等方面发挥着关键作用^[4], 特别是在干旱、半干旱的生态脆

弱山区, 水源涵养功能对维持生态安全和社会经济发展具有重要作用。水源涵养功能由产水量和径流量共同决定, 随着林地面积扩大, 林地蒸腾作用的增强会减少地下水补给和流域径流总量甚至减少旱季基流^[5], 从而影响水源涵养功能。不同学者对林地与产水量之间的关系也存在不同观点, SUN 等^[6-7] 研究认为林地的增加会降低年产水量, 而 TEIXEIRA 等^[8] 则认为林地的再生增加了森林产水量^[6-8]。此外, 不同立地条件、林地空间布局和林分结构也会影响水源涵养功能的发挥。目前国内外学术界对林地资源的研究主要集中于林地动态变化及驱动力分析^[9]、森林生物量估算^[10-11]、退耕还林影响^[12-13] 等方面, 有关水源涵养功能的研究多关注区域水源涵养功能的变化特征及影响因素分析^[14-15], 影响因素多侧重气候变化、地形、人类活动、土地利用类型等方面^[16-19]。由于水源涵养功能受多种因素共同影响, 其过程较为复杂, 林分结构较难定量描述等^[20], 目前就林地面积和林分结构变化对水源涵养功能影响及其耦合关系的研究较少见, 林地面积和结构与水源涵养功能之间的相互关系成为当前学术界亟需解决的热点问题。

张家口市地处干旱半干旱过渡的农牧交错区, 位于京津上风上水位置, 是京津地区重要的水源涵养区和生态屏障^[21], 承担着提供清洁水源和阻挡风沙的任务。但

收稿日期: 2023-01-06 修订日期: 2023-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目“冀北山区‘生产-生活-生态’空间演化机理与优化调控研究”(41971238)

作者简介: 王世清, 研究方向为土地利用变化及生态效应。Email: wangsq20@163.com。

※通信作者: 许月卿, 副教授, 研究方向为土地多功能与国土空间优化。Email: xmoonq@sina.com。

张家口市降水量小、蒸发量大,人均水资源占有量不足全国平均量的 1/5。20 世纪 80 年代以来,张家口水资源量和向京输水量均呈下降趋势,全市水利基础设施薄弱,水源涵养功能亟需增强。自 1978 年以来,张家口市陆续实施了“三北”防护林建设、京津风沙源治理、退耕还林、封山育林、飞播造林等一系列生态建设工程,林地面积持续扩大,林地时空分布格局不断变化,林分结构发生重组,水源涵养功能变化显著,亟待加强林地和水源涵养功能时空变化及其耦合关系研究,以顺应研究区定位首都水源涵养区和生态支撑区的建设需要,为林地规划和生态建设提供科学依据。

鉴于此,本文以张家口市为研究区,基于遥感影像数据、气象数据、土壤数据、林地数据等多源数据,综合运用 InVEST 模型、SPSS 模型等方法模型,系统分析张家口市 1990—2020 年林地和水源涵养功能的时空格局演变特征,探讨林地和水源涵养功能的相互关系,以期对张家口市林地布局调整、树种选择和生态建设工程的实施提供决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

张家口市位于河北省西北部,地处干旱、半干旱的农牧交错带地区,地理位置介于 39°30′~42°10′N, 113°50′~116°30′E 之间,总面积约为 3.68 万 km²,辖 4 区 13 县。地势西北高、东南低,海拔高程 399~2 835 m。张家口市分属永定河、潮白河、大清河、滦河和内陆河水系,境内官厅水库为首都用水提供保障^[22],是首都重要的水源涵养地。该市为温带大陆性季风气候^[23],降水集中在夏季,多年平均降水量为 452 mm,年平均气温 7.5 °C。截至 2020 年底,张家口市总人口为 411.89 万人,GDP 为 160 亿元,土地利用类型以耕地、林地和草地为主,其中林地面积占比最大,为 37.10%。就林分结构而言,针叶林占比为 12.11%,阔叶林占比为 38.94%,灌木占比为 48.95%。

1.2 数据来源与处理

本研究采用的基础数据主要包括遥感影像数据、地形数据、气象数据、土壤数据和林地数据等。张家口市 1990 年、2000 年、2010 年 Landsat-TM 影像和 2020 年 Landsat-OLI 影像主要源于地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn/),分辨率为 30 m。结合 ENVI 软件,通过人工目视解译得到 4 个时期的土地利用类型数据,参照国家基本资源与环境本底动态遥感调查数据库的分类体系,结合研究区土地利用类型特征,将土地利用类型分为耕地、园地、林地、草地、建设用地、交通运输用地、水域和未利用地 8 大类,土地利用影像解译总体精度分别为 86.82%, 88.92%, 90.46% 及 90.23%,各地类 Kappa 系数均超过 0.80,能够满足本研究的需要,基于土地利用类型数据提取研究期内林地数据,进行林地时空变化研究。地形数据包括海拔、坡度,坡度数据通过 ASTER GDEM (30 m 分辨率) 高程数据提取得到;

气象数据包括逐月降水量、逐月蒸发量数据等,来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn),分辨率为 1 km,基于 ArcGIS 软件平台运用栅格图层进行波段提取并分别计算得到 1990 年、2000 年、2010 年及 2020 年年平均降水量及蒸发量;土壤数据来源于世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.1) (HWSD) 中的中国土壤数据集,分辨率为 300 m;1985 年、2000 年及 2015 年林分结构数据来源于张家口市林业局提供的森林资源清查数据,借助 ArcGIS 软件重采样到 30 m 分辨率,2020 年林分结构数据来源于《1:1 000 000 中国植被图集》,分辨率为 1 km。将所有空间数据统一到西安 80 坐标系高斯-克吕格投影,并转化为 300 m×300 m 栅格图层。

2 研究方法

2.1 林地变化分析

借助土地利用转移矩阵将林地向其他地类的转换归为林地减少的方向,将其他地类向林地的转换归为林地增加的方向,将其他地类之间的转换以及林地自身之间的转换归为林地未发生变化的方向,据此对研究期内张家口市林地数量的变化进行分析。

2.2 水源涵养量计算

常用的水源涵养评估方法包括综合蓄水法、土壤蓄水法、水量平衡法、综合指数法等。综合蓄水法综合考虑了林冠层、枯落物层和土壤层,考虑层次较多、实际操作较难;土壤蓄水法只考虑了土壤层的作用,忽略了枯落物层和林冠层的蒸散发,误差较大;综合指数法操作较复杂且专家打分存在一定的主观性;水量平衡法将水源涵养量以产水量近似表示,在干旱半干旱地区年降水量小于 400 mm 的情况下,森林水源涵养能力的评估侧重于维持系统和供给水源的功能,以产水量为指标能够充分反映森林提供水源的能力,与研究目标更加契合^[24]。然而,简单地以产水量作为研究指标忽略了森林生态的具体过程,理论上存在缺陷,因此,本研究采用调整后的水量平衡法,在基于 InVEST 模型得到研究区产水量的基础上减掉区域地表径流量,从而对张家口市水源涵养量进行测算^[25],其表达式为

$$C_{xj} = Y_{xj} - R_i \quad (1)$$

式中 C_{xj} 为区域水源涵养量, mm; Y_{xj} 为年产水量, mm; R_i 为地表径流量, mm。

$$Y_{xj} = \left[1 - \frac{E_{xj}}{P_x} \right] \times P_x \quad (2)$$

式中 E_{xj} 为栅格单元 x 中土地利用类型 j 的年实际蒸散发量, P_x 为栅格单元 x 的多年平均降水量。

$$\frac{E_{ij}}{P_i} = \frac{1 + \omega_i R_{ij}}{1 + \omega_i R_{ij} + 1/R_{ij}} \quad (3)$$

式中 R_{ij} 为干燥指数,表示潜在蒸发量与降雨量的比值, ω_i 为修正植被年可用降水量与降水量的比值。

$$R_{ij} = \frac{k \times T_0}{P_i} \quad (4)$$

$$\omega_i = Z \frac{A_i}{P_i} \quad (5)$$

$$T_0 = 0.0013 \times 0.408 \times H \times (T_{avg} + 17) \times (T_d - 0.0123P)^{0.76} \quad (6)$$

$$A_i = \min(M_{sd}, R_d) \times C_i \quad (7)$$

$$C_i = 54.509 - 0.132S_{sand} - 0.003S_{sand}^2 - 0.055S_{silt} - 0.006S_{silt}^2 - 0.738S_{clay} + 0.007S_{clay}^2 - 2.688O_m + 0.501O_m^2 \quad (8)$$

式中 k 为蒸散系数, T_0 为作物潜在蒸散量, mm; H 为太阳顶层大气辐射, W/m^2 [26], T_{avg} 、 T_d 分别为最高日均温和最低日均温的平均值和差值, $^{\circ}C$; A_i 为可利用含水率, %; M_{sd} 为最大土层厚度, cm; R_d 为根系深度, cm; C_i 为植被可利用水, S_{sand} 为土壤沙砾含量, %; S_{silt} 为土壤粉粒含量, %; S_{clay} 为土壤黏粒含量, %; O_m 为土壤有机质含量, g/kg; Z 为 Zhang 系数, 表征降水季节性特征。

2.3 林地与水源涵养功能关系分析

定量测算林地面积、林分结构与水源涵养量之间的关系可以得到直观的数据并基于此对林地布局进行合理的调整。由于林地分布、林分结构及水源涵养量均为栅格图层, 数据量较大, 无法直接进行定量关系分析, 因此借助渔网工具生成规则采样网格, 对栅格数据采样后进行统一处理分析。在创建渔网网格过程中, 不同网格尺度所获取的数据量不同, 需要注意避免数据冗余影响结果精度或数据过少不能有效表征研究对象之间的关系等问题, 此外, 若只获取一组数据进行分析会存在结果误差且无法得出规律性特征, 因此通过多次提取试验, 在操作过程中选择创建 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 、 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 及 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的网格对数据进行提取并运用 SPSS 软件进行显著性检验和相关性分析, 最终得到林地面积与水源涵养量的定量关系。

3 结果与分析

3.1 张家口市林地时空变化特征

3.1.1 林地面积变化特征

将张家口土地利用类型重分类为林地和非林地并得到图 1, 研究期内张家口市林地分布具有明显的空间集聚特征且分布范围不断扩大。1990 年林地集中分布在海拔较高的赤城县、崇礼县、尚义县及涿鹿县和蔚县交界处; 2000 年林地分布格局与 1990 年基本一致, 集中分布在研究区北部及东南部; 2010 年林地面积向研究区北部的张北县和康保县扩展; 2020 年林地面积显著增加, 赤城县、崇礼县、张北县、康保县、涿鹿县和蔚县的林地分布扩展明显。

运用土地利用转移矩阵计算研究期内张家口市林地

面积变化并得到表 1 和图 2。1990—2020 年张家口市林地面积持续增加, 由 $9\,144.99\text{ km}^2$ 增加至 $13\,650.36\text{ km}^2$, 增幅达 49.27%。其中, 1990—2000 年, 林地面积变化较小, 林地净增加面积为 561.31 km^2 , 主要发生在蔚县和康保县, 林地减少面积为 7.48 km^2 ; 2000—2010 年, 林地面积共增加 $1\,351.41\text{ km}^2$, 增加的林地主要分布于下花园区以及研究区北部的张北县、尚义县、赤城县等县, 这一时期林地减少的面积为 39.55 km^2 , 减少的林地主要位于万全县和蔚县; 2010—2020 年, 林地面积显著增加, 由 $11\,057.71\text{ km}^2$ 增加为 $13\,650.36\text{ km}^2$, 这一时期赤城县、崇礼县、沽源县、尚义县、涿鹿县、宣化县等较多县域林地面积均有较大增加, 而林地减少的面积与前两个时段相比也有所提高, 为 412.71 km^2 , 减少的林地主要来源于阳原县、怀来县、康保县等县。

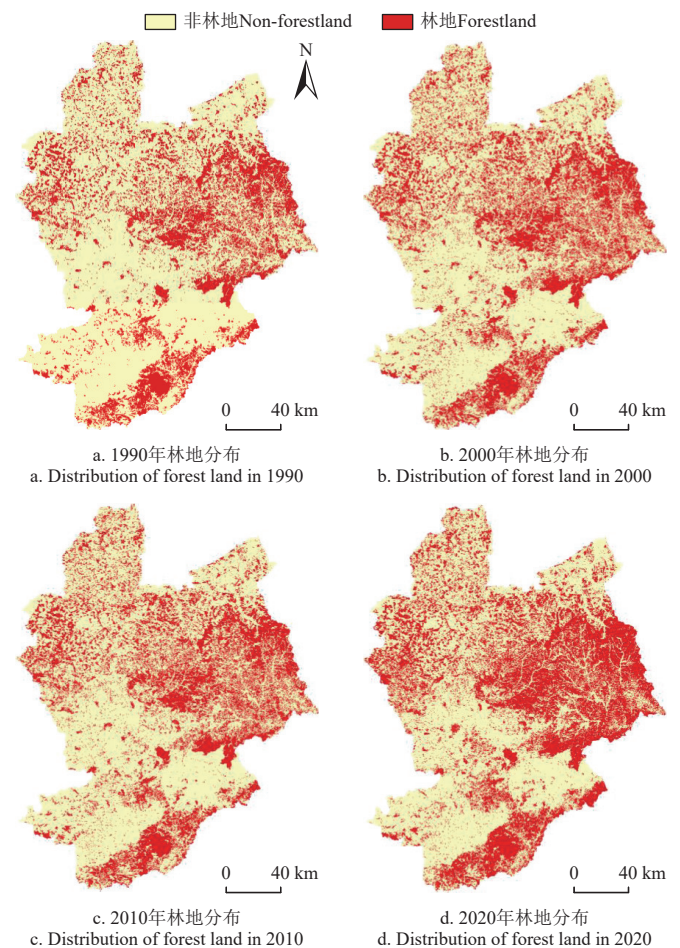


图 1 1990—2020 年张家口市林地空间分布

Fig.1 Distribution of forestland in Zhangjiakou City from 1990 to 2020

表 1 1990—2020 年张家口市林地面积变化

林地变化 Change of forestland	1990—2000	2000—2010	2010—2020
增加 Increase	568.78	1 490.97	3 005.45
减少 Decrease	7.48	39.55	412.71

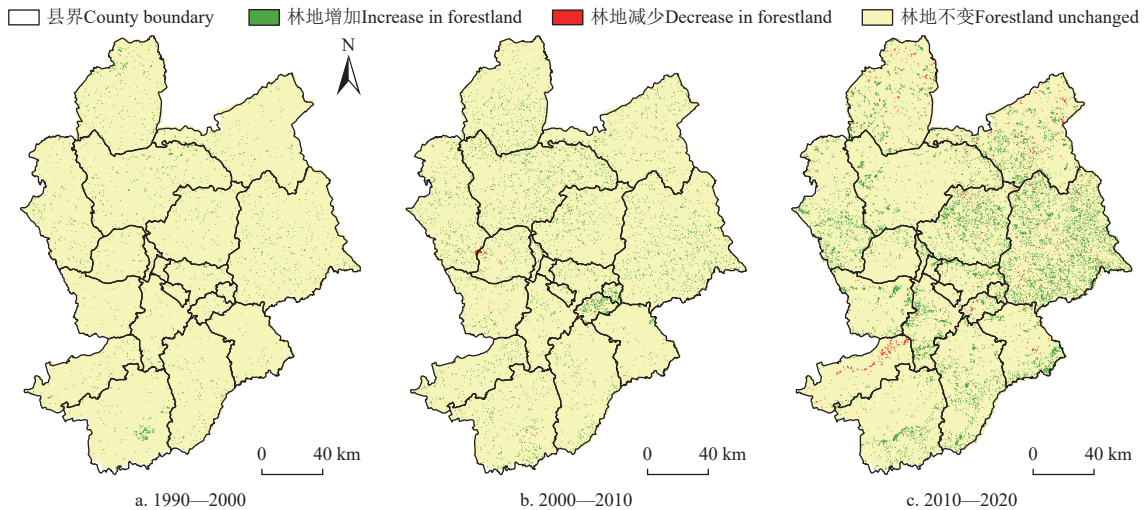


图 2 1990—2020 年张家口市林地空间变化
Fig.2 Changes of forestland in Zhangjiakou City from 1990 to 2020

3.1.2 林分结构变化特征

受数据获取影响, 2020 年张家口市林分结构数据分辨率为 1 km, 而 1985 年、2000 年及 2015 年林分结构数据分辨率均为 30 m, 1 km 分辨率数据在市域层面精度较低, 因此选用 1985 年、2000 年及 2015 年数据对张家口市林分结构的演化特征进行分析 (图 3), 并统计得到表 2。1985—2015 年, 研究区针叶林、阔叶林及灌木面积均持续增加, 其中阔叶林主要分布在研究区东部并逐

渐向西部扩展, 3 个时期面积分布均最广, 分别占林地总面积的 57.67%、58.45% 及 58.03%, 增长率为 75.40%。灌木主要分布在研究区东部的赤城县、崇礼县等县并逐渐向研究区中部及东部扩展, 增速最快, 由 1985 年的 2 076.66 km² 增长为 2015 年的 4 062.79 km², 增速达 95.64%。针叶林在张家口市林地总面积中所占比例最低, 增长率最低, 增速仅为 36.02%, 主要分布在研究区北部的沽源县、崇礼县等县并向南部扩展。

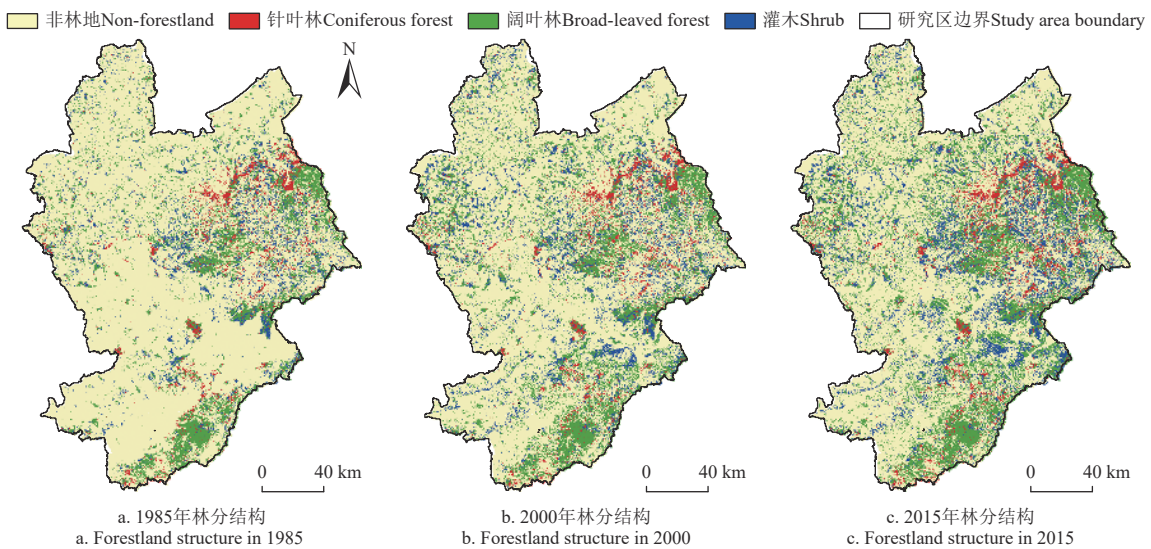


图 3 1985—2015 年张家口市林分结构分布
Fig.3 Distribution of forestland structure in Zhangjiakou City from 1985 to 2015

表 2 1985—2015 年张家口市不同林分结构面积及占比

Table 2 Area and proportion of different forestland structures in Zhangjiakou City from 1985 to 2015

林分结构 Forestland structure	1985		2000		2015	
	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%	面积 Area/km ²	比例 Proportion/%
针叶林 Coniferous forest	1 287.05	16.20	1 474.70	13.27	1 750.59	12.64
阔叶林 Broad-leaved forest	4 582.04	57.67	6 496.52	58.45	8 036.82	58.03
灌木 Shrub	2 076.66	26.14	3 143.17	28.28	4 062.79	29.33

3.2 张家口市水源涵养功能时空变化特征

1990—2020 年，张家口市平均水源涵养量呈先减少后增加再减少的变化趋势，其中 1990 年平均水源涵养量最高，为 146.01 mm，2000 年平均水源涵养量最低，为 82.35 mm，2010 年和 2020 年张家口市平均水源涵养量分别为 142.50 及 126.35 mm。1990—2020 年张家口市水源涵养量空间分布格局如图 4 所示，水源涵养功能整体表现为东部及南部高、中部及西部低的分布格局。1990—2000 年水源涵养量较高值区分布范围缩小，仅在东部和南部的崇礼县、赤城县和沽源县交界处、涿鹿县和蔚县交界处以及蔚县南部等海拔较高的地区水源涵养量较高，而在研究区中部及西部的大部分地区较低。2000—2010 年研究区北部的赤城县、张北县、尚义县等县域水源涵养量明显增加，而万全县、怀安县、宣化县、阳原县等坝下平原地区的水源涵养量仍较低。2010—2020 年张家口市北部坝上高原地区的赤城县、崇礼县、沽源县、张北县、康保县及南部涿鹿县及蔚县等山区的水源涵养量较高，而在中部及西部的怀安县、万全县、阳原县、宣化县等县的水源涵养量较低。

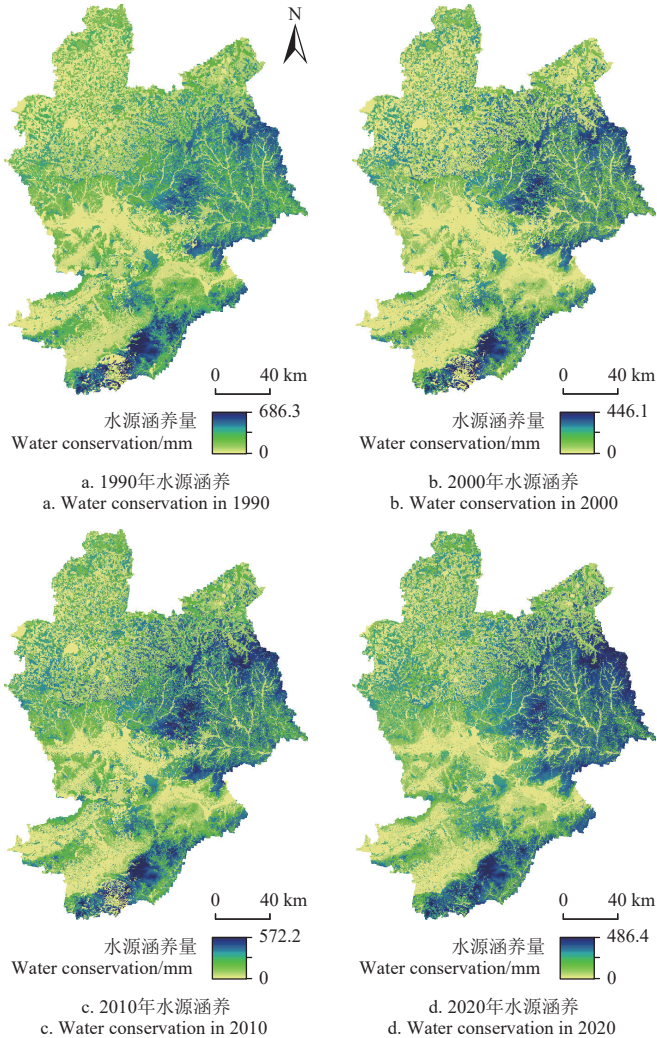


图 4 张家口市水源涵养量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of water conservation in Zhangjiakou City

由张家口市水源涵养功能变化图 5 可知，与 1990 相比，2000 年水源涵养量增加的区域范围较小，集中分布

在研究区北部的赤城县、崇礼县、张北县、尚义县、康保县和沽源县，而研究区南部地区水源涵养量普遍呈减少趋势；相较于 2000 年，2010 年研究区大部分地区水源涵养量增加，水源涵养量的减少仅发生在蔚县和涿鹿县交界处；2010—2020 年研究区东部及北部水源涵养量普遍增加而中部及西部的阳原县、怀安县、万全县等县水源涵养量减少，与这一时期林地的变化呈现出一定的相似性。

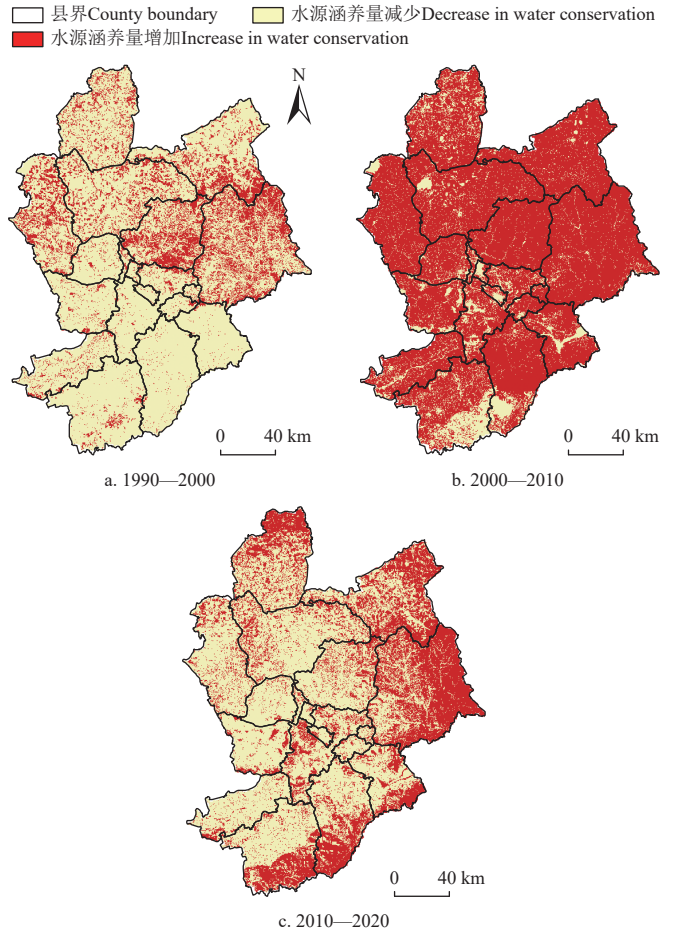


图 5 1990—2020 年张家口市水源涵养量变化

Fig.5 Changes of water conservation in Zhangjiakou City from 1990 to 2020

3.3 张家口市林地与水源涵养功能关系分析

3.3.1 林地面积与水源涵养功能关系的定性分析

由图 1 和图 4 可见，林地和水源涵养功能空间分布均表现为东部及南部高，中部及西部低的空间分布格局，二者在空间分布上具有较好的一致性。在 GIS 技术支持下，将 1990—2020 年间林地空间分布图和对应年份的水源涵养功能空间分布图叠加，统计分析 1990—2020 年张家口市各区县林地面积和平均水源涵养量的关系（图 6）。结果表明，林地面积较多的县其平均水源涵养量较高，而林地面积较少的县其平均水源涵养量较低。1990—2020 年林地面积分布较大的县为赤城县、崇礼县、沽源县、涿鹿县、尚义县等县，平均水源涵养深度较高的县为赤城县、崇礼县、涿鹿县、沽源县、怀来县等县。可见，张家口市林地与水源涵养功能在空间分布上呈现出高度一致性。

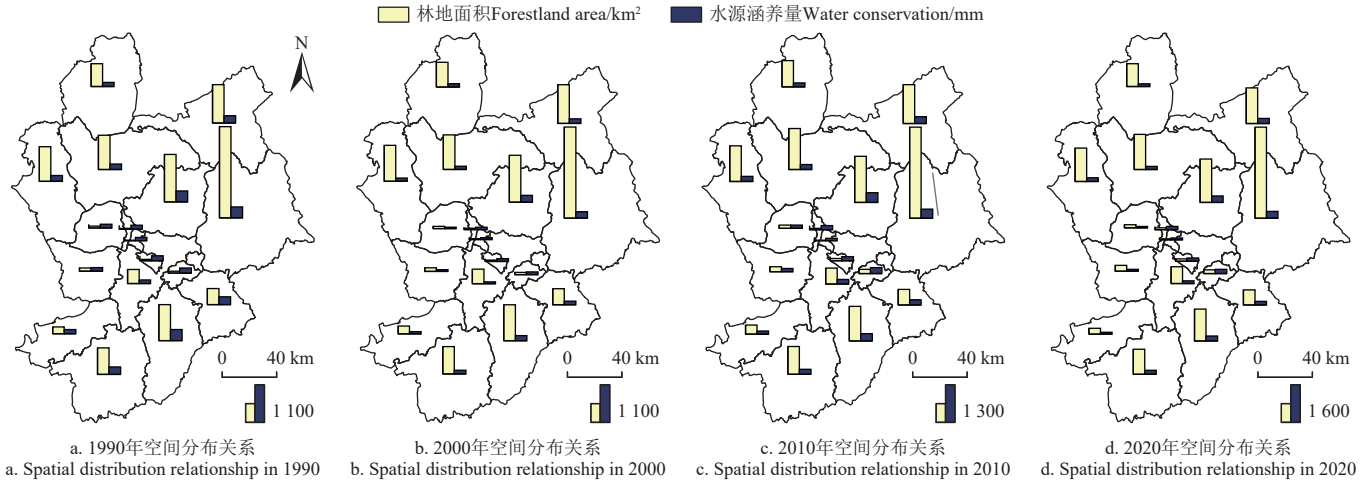


图6 张家口市林地与水源涵养空间分布关系

Fig.6 Spatial distribution relationship between forestland and water conservation in Zhangjiakou City

3.3.2 林地面积与水源涵养功能关系的定量分析

为探讨张家口市水源涵养量与林地面积关系的规律,借助渔网工具分别创建 1 km×1 km、2 km×2 km 及 3 km×3 km 的网格并提取张家口市林地面积及水源涵养量,借

助 SPSS 软件对林地面积及水源涵养量进行定量分析。由于数据量过大会造成数据冗余、影响分析精度,因此在剔除无效数据组后运用随机抽样分别抽取合适的样本量进行分析并得到图 7。

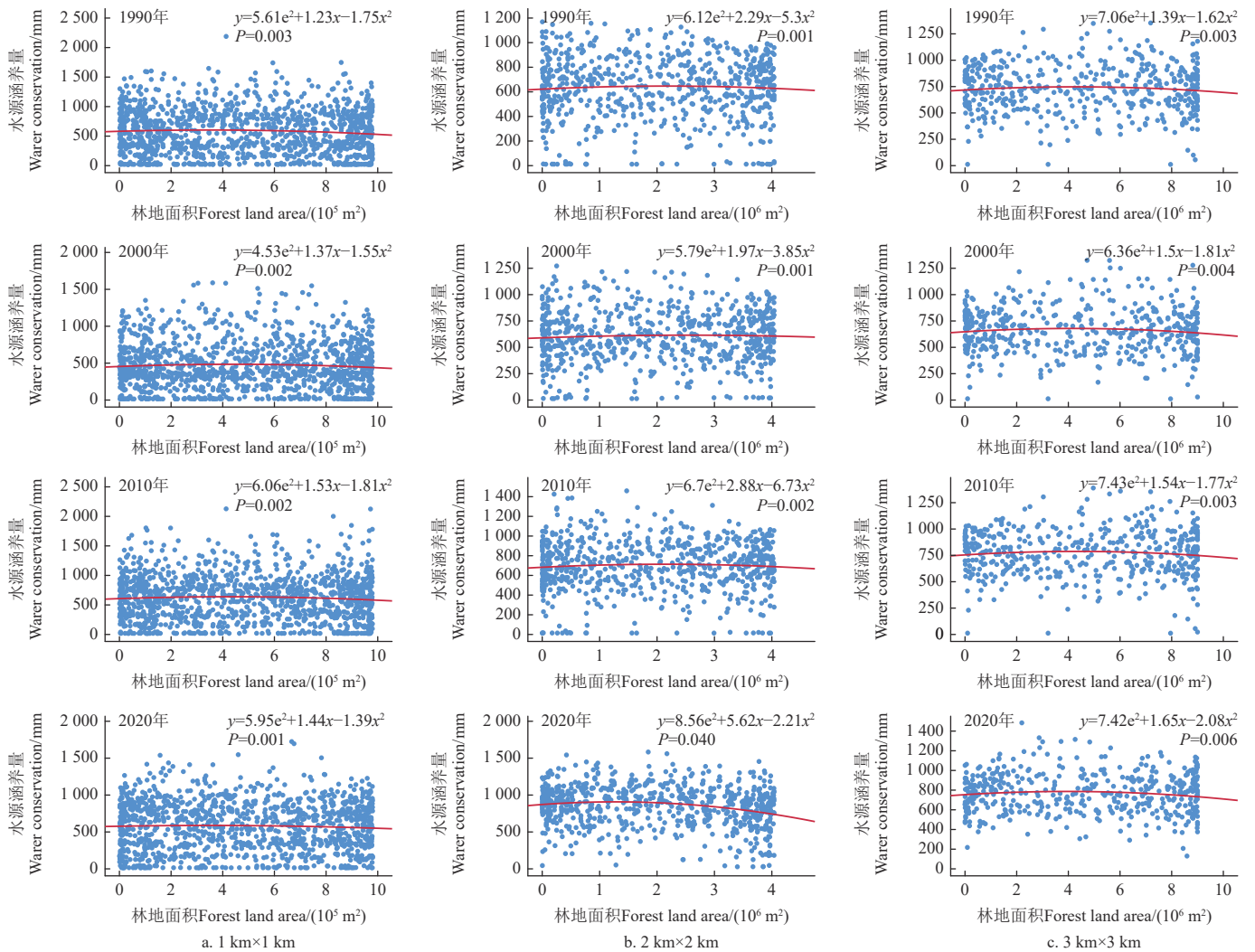


图7 张家口林地面积与水源涵养量关系定量分析

Fig.7 Quantitative analysis of the relationship between forest-area and water conservation in Zhangjiakou City

基于上述 3 个尺度提取出的 1990—2020 年张家口市林地面积 (m^2) 与水源涵养量 (mm) 的 P 值均通过了显著性检验。图中曲线为总计拟合线, 是根据平面上离散点组所表示的坐标之间的函数关系绘制的, 能代表数据组的变化趋势。1 km 网格提取后分析结果显示, 1990—2020 年水源涵养量均随林地面积增加呈先增加后减少的变化趋势, 当林地面积达到格网面积的一半即 50 万 m^2 时, 水源涵养量达到峰值; 2 km 网格提取结果显示, 1990—2020 年水源涵养量随林地面积增加呈先增加后减少的趋势, 当林地面积达到格网面积的一半即 200 万 m^2 时, 水源涵养量达到峰值; 3 km 网格提取结果同样呈倒“U”型, 即研究期内随林地面积增加水源涵养量先增加后减少, 当林地面积达到格网面积的一半即 450 万 m^2 时, 水源涵养量达到峰值。由此可推, 当采样区域内林地面积达到采样区总面积的 1/2 时, 采样区内水源涵养量达到最大值, 若将采样尺度不断扩大并将研究区域看作多个网格的组合, 则可将栅格采样得到的微观尺度上的结论推广至中观尺度, 因此研究认为, 当林地面积超过区域总面积的 1/2 时, 区域水源涵养功能不再随林地面积增加而增强, 即林地水源涵养功能存在阈值, 超过阈值后, 水源涵养量开始下降。

3.3.3 林分结构与水源涵养功能关系分析

由于本文仅计算了 1990、2000、2010 及 2020 年的水源涵养量, 而获取到的林分结构数据为 1985、2000、2015 及 2020 年, 因此仅对 2000 年及 2020 年张家口市林分结构及水源涵养量进行分析。借助 GIS 工具, 统计不同林分结构地块上的平均水源涵养量, 结果如表 3 所示。2000 及 2020 年不同林分结构的平均水源涵养量均表现为阔叶林最高, 针叶林次之, 灌木再次, 非林地水源涵养量最低。这是因为乔木林的枯枝落叶中含有大量的木质素、酚类化合物等, 不易被分解, 可以有效减少地表径流, 因此水源涵养能力强于灌木。此外, 与 2000 年相比, 2020 年各林分结构的水源涵养量普遍上升, 不同林分结构之间的平均水源涵养量差距缩小, 这是因为近年来研究区降雨量增加, 林地水分补给来源增多, 林地生长环境得到改善, 各林分结构的水源涵养能力普遍增强。

表 3 2000—2020 年张家口市不同林分结构平均水源涵养量
Table 3 Average water conservation of different forest structures in Zhangjiakou City from 2000 to 2020 mm

年份 Year	针叶林 Coniferous forest	阔叶林 Broad-leaved forest	灌丛 Shrub	非林地 Non-forest land
2000	196.69	230.81	176.52	58.48
2020	273.51	278.24	244.72	124.59

4 讨论与结论

4.1 讨论

张家口市地处北京上风上水的位置, 发挥着涵养水源、保持水土、防风固沙的重要作用, 自 1978 年起先后

实施了“三北”防护林建设、京津风沙源治理、退耕还林等一系列生态文明建设工程, 使得研究期内林地不断扩展, 林地面积共增加 4 505.37 km^2 , 主要分布在地形较为崎岖的赤城县、崇礼县、涿鹿县、蔚县、怀来县等县。张家口市水源涵养功能高值区主要分布在海拔较高的东部和南部山区, 这里山高坡陡, 受人类活动影响较弱, 林地分布面积广泛, 其水源涵养功能较高。而中部和西部阳原县、怀安县、万全县、宣化区等区县林地面积较少, 是水源涵养功能低值区主要分布区域, 林地的时空分布格局与水源涵养功能具有较好地一致性。

研究期内不同采样尺度采样结果均呈现出随林地面积的持续增加水源涵养量增加, 当林地面积超过区域总面积的 1/2 时水源涵养量开始降低的变化趋势, 这说明林地面积对水源涵养量的促进作用存在阈值。这与 LI 等^[27]的研究结果相一致, 造成该结果的原因是干旱半干旱地区快速增加的林地面积使得植被蒸腾作用增强, 径流量和土壤含水量减少, 进而导致水源涵养功能降低。同时 XU 等^[28]发现持续增加的森林覆盖率会减少河流径流量, 进而导致区域水源涵养功能降低, 为本研究结果提供了支持。因此, 张家口市在对林地进行规划和建设的过程中不能一味追求林地面积的持续增加, 而应确定最合理的林地种植面积, 从而保证林地水源涵养能力的完全发挥。通过对不同林分结构进行研究发现, 阔叶林的水源涵养能力最强, 灌木次之, 而针叶林的水源涵养能力最弱, 这与彭妮等的研究结果相一致^[29-30]。此外, 其他相关研究也表明, 就水源涵养能力而言原生林强于次生林^[31], 混交林强于纯林^[32]。因此, 张家口市的林地规划也要考虑不同树种之间的搭配种植, 优化树种结构, 丰富树种多样性。根据实地调查结果发现, 当前张家口市退耕还林的林种以经济林为主, 其中果林所占比重较大, 果品产业总产值超 139.7 亿元, 对该市农民收入的贡献率超过 20%, 未来张家口市应合理规划经济林与其他林种的种植面积, 同时注重混交林与原生林的种植, 实现社会经济和生态保护协同发展。同时对张家口市不同地区的林地应实施差异化管护, 如对坝上防护林区实施抚育管护和林地质量提升; 对坝下水源涵养林区实施封山育林和补植补造; 对经济林区采取森林质量提升措施。

本文仅对张家口市林地与水源涵养功能之间的关系进行了分析, 仅能从林地面积和林分结构角度为水源涵养功能的提高提供参考, 除林地面积和林分结构外水源涵养量还受林地质量、土壤、降水量、土地利用等其他因素的影响^[33-34], 同样, 对林地规划建设而言也仅能从水源涵养功能这一角度出发提供建议, 在进行林地规划和最优化布局过程中还应考虑防风固沙、水土保持、生物多样性等其他生态服务功能及地形等其他因素的影响。因此未来研究应对影响水源涵养功能的各因素进行定量研究, 综合调控各种因素从而实现区域水源涵养功能的完全发挥, 同时根据各生态服务功能重要性和其他因素进行最合理的林地规划种植。

4.2 结论

本文以张家口市为案例区,借助遥感影像数据、土壤数据、林地数据等多源数据,运用 InVEST 模型、SPSS 模型等模型系统分析了 1990—2020 年张家口市林地和水源涵养功能的时空分布特征及其相互关系,得到如下结论:

1) 1990—2020 年张家口市林地面积持续增加且具有明显的空间集聚特征,林地主要分布在研究区东部及南部。就林分结构而言,阔叶林所占面积最大,在研究区内广泛分布;灌木主要分布在研究区东部及中部,增速最快;针叶林所占比重较少、增速较慢,仅在研究区北部的沽源县、崇礼县等县分布较多。

2) 1990—2020 年研究区水源涵养功能整体表现为东部及南部高,中部及西部低的空间分布格局,其平均水源涵养量呈现出先减少后增加再减少的趋势,1990 年平均水源涵养量最高,2000 年平均水源涵养量最低。

3) 研究期内张家口市林地分布与水源涵养功能的分布在空间上呈现出高度一致性。随林地面积增加,水源涵养量呈先增加后减少的变化趋势,当林地面积达到格网面积的 1/2 时,格网内水源涵养量达到峰值。不同林分结构的水源涵养量能力从大到小排序为阔叶林、针叶林、灌木。

[参考文献]

- [1] 刘效东,张卫强,冯英杰,等.森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望[J].生态学报,2022,41(4):784-791. LIU Xiaodong, ZHANG Weiqiang, FENG Yingjie, et al. Research on water conservation function of forest ecosystem: Progress and prospect[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(4): 784-791. (in Chinese with English abstract)
- [2] 孙阁,张槽,王彦辉.准确理解和量化森林水源涵养功能[J].生态学报,2023,43(1):9-25. SUN Ge, ZHANG Lu, WANG Yanhui. On accurately defining and quantifying the water retention services of forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 9-25. (in Chinese with English abstract)
- [3] Hua F Y, Bruijnzeel L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches[J]. Science, 2022, 376(6595): 839-844.
- [4] 陈斌,杨顶田,徐尚昭,等.1990—2015年湖北省林地遥感制图与时空变化分析[J].生态科学,2021,40(6):125-132. CHEN Bin, YANG Xiangtian, XU Shangzhao, et al. Analysis of spatial and temporal changes and attribution discrimination of forestland in Hubei Province from 1990 to 2015[J]. Ecological Science, 2021, 40(6): 125-132. (in Chinese with English abstract)
- [5] ZHOU G Y, XIA J, ZHOU P, et al. Not vegetation itself but mis-revegetation reduces water resources[J]. Science China (Earth Sciences), 2021, 64(3): 404-411.
- [6] SUN G, ZHOU G Y, ZHANG Z Q, et al. Vose. Potential water yield reduction due to forestation across China[J]. Journal of Hydrology, 2005, 328(3): 548-558.
- [7] LI Q, WEI X H, ZHANG M F, et al. Forest cover change and water yield in large forested watersheds: A global synthetic assessment[J]. Ecohydrology, 2017, 10(4): e1838.
- [8] TEIXEIRA G M, FIGUEIREDO P H A, SALEMI L F, et al. Regeneration of tropical montane cloud forests increases water yield in the Brazilian Atlantic Forest[J]. Ecohydrology, 2021, 14(5): 2298.
- [9] 唐明贵,胡静,汤慧,等.中国森林乡村空间分布特征及其影响因素分析[J].农业工程学报,2022,38(10):258-266. TANG Minggui, HU Jing, TANG Hui, et al. Spatial distribution and influencing factors of forest villages in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 258-266. (in Chinese with English abstract)
- [10] 周俊宏,王子芝,廖声熙,等.基于GF-1影像的普达措国家公园森林地上生物量遥感估算[J].农业工程学报,2021,37(4):216-223. ZHOU Junhong, WANG Zizhi, LIAO Shengxi, et al. Remote sensing estimation of forest aboveground biomass in Potatso National Park using GF-1 images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(4): 216-223. (in Chinese with English abstract)
- [11] 宋涵玥,舒清志,席磊,等.基于星载ICESat-2/ATLAS数据的森林地上生物量估测[J].农业工程学报,2022,38(10):191-199. SONG Hanyue, SHU Qingtai, XI Lei, et al. Remote sensing estimation of forest above-ground biomass based on spaceborne lidar ICESat-2/ATLAS data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 191-199. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵兵兵,刘殿锋.多情景退耕还林对林地生物多样性保护价值的潜在影响[J].农业工程学报,2022,38(20):239-249. ZHAO Bingbing, LIU Dianfeng. Potential impacts of multi-scenario farmland reforestation on the biodiversity conservation values of forests[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(20): 239-249. (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙龙,张光辉,王兵,等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报,2017,33(10):191-197. SUN Long, ZHANG Guanghui, WANG Bing, et al. Soil erosion resistance of black locust land with different ages of returning farmland on Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 191-197. (in Chinese with English abstract)
- [14] 兰翔宇,叶冲冲,王毅,等.1995—2014年青藏高原水源涵养功能时空演变特征及其驱动力分析[J].草地学报,2021,29(S1):80-92. LAN Xiangyu, YE Chongchong, WANG Yi, et al. Spatiotemporal variation characteristics and its driving forces of water conservation function on the Tibetan Plateau from 1995 to 2014[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 80-92. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吕乐婷,李青,杨勇.辽宁省2001—2020年水源涵养量变化及其影响因素[J].水土保持通报,2022,42(1):290-296.

- LV Leping, LI Qing, YANG Yong. Change and influencing factors of water conservation in Liaoning Province during 2001-2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 290-296. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王辉源, 宋进喜, 吴琼. 气候变化背景下秦岭水源涵养功能时空变异特征[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 212-219.
WANG Huiyuan, SONG Jinxi, WU Qiong. Temporal and spatial variation characteristics of water conservation function of Qinling mountains under the background of climate change[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 212-219. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐影仙, 巩杰, 李焱, 等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4291-4301.
XU Caixian, GONG Jie, LI Yan, et al. Spatial distribution characteristics of typical ecosystem services based on terrain gradients of Bailongjiang Watershed in Gansu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4291-4301. (in Chinese with English abstract)
- [18] 史东梅, 蒋光毅, 彭旭东, 等. 城镇化人为扰动下垫面类型影响水源涵养功能的评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 92-102.
SHI Dongmei, JIANG Guangyi, PENG Xudong, et al. Evaluation on impact of artificial disturbed underlying surfaces on water retention function during urbanization process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(22): 92-102. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨思敏, 权全, 徐家隆, 等. 延河流域土地利用变化过程中水源涵养功能研究[J]. *中国水土保持*, 2022(8): 33-36.
YANG Simin, QUAN Quan, XU Jialong, et al. Water conservation function in the process of land use change in Yanhe River Basin[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022(8): 33-36. (in Chinese with English abstract)
- [20] 伍冰晨, 齐实, 郭郑曦, 等. 西南山区林地空间格局和微地形对坡面地表产流的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(8): 108-116.
WU Bingchen, QI Shi, GUO Zhengxi, et al. Effects of forestland spatial pattern and micro-topography on surface runoff in a mountainous area of southwestern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(8): 108-116. (in Chinese with English abstract)
- [21] PAN T S, ZUO L J, ZHANG Z X, et al. Impact of land use change on water conservation: A case study of Zhangjiakou in Yongding River[J]. *Sustainability*, 2020, 13(1): 22.
- [22] 刘超, 许月卿, 卢新海. 生态脆弱贫困区土地利用多功能权衡/协同格局演变与优化分区——以张家口市为例[J]. *经济地理*, 2021, 41(1): 181-190.
LIU Chao, XU Yueqing, LU Xinhai. Spatio-temporal evolution and optimization regionalization of trade-off and synergy of land use functions in ecologically fragile and poverty areas: A case study of Zhangjiakou City[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(1): 181-190. (in Chinese with English abstract)
- [23] 冀正欣, 刘超, 许月卿, 等. 基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 222-231.
JI Zhengxin, LIU Chao, XU Yueqing, et al. Identification and optimal regulation of the production-living-ecological space based on quantitative land use functions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(18): 222-231. (in Chinese with English abstract)
- [24] 贾雨凡, 杨勤丽, 胡非池, 等. 变化环境下的水源涵养能力评估研究进展[J]. *水利水运工程学报*, 2022(1): 37-47.
JIA Yufan, YANG Qinli, HU Feichi, et al. Prospect and progress of water conservation capacity evaluation in a changing environment[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 37-47. (in Chinese with English abstract)
- [25] 魏培洁, 吴明辉, 贾映兰, 等. 基于 InVEST 模型的疏勒河上游产水量时空变化特征分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(15): 6418-6429.
WEI Peijie, WU Minghui, JIA Yinglan, et al. Spatiotemporal variation of water yield in the upstream regions of the Shule River Basin using the InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6418-6429. (in Chinese with English abstract)
- [26] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局. *生态学报*, 2013, 33 (3): 789-797.
FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan county[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 789-797. (in Chinese with English abstract)
- [27] LI S, LIANG W, FU B J, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 6: 569-570.
- [28] XU Z P, MAN X L, DUAN L L, et al. Assessing the relative contribution of increased forest cover to decreasing river runoff in two boreal forested watersheds of Northeastern China[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2022, 22(1): 113-125.
- [29] 彭妮, 张凯, 赵国珍, 等. 交城县国有林场主要林分类型枯落物层和土壤层水源涵养功能[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(12): 122-132.
PENG Wei, ZHANG Kai, ZHAO Guozhen, et al. The water conservation function of the litter layer and soil layer of main forest types in the state-owned forest farm of Jiaocheng County[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(12): 122-132. (in Chinese with English abstract)
- [30] 唐佳俊, 田羽琨, 商艳君, 等. 贵州省拱拢坪国有林场森林生态系统水源涵养功能评估[J]. *林业资源管理*, 2022(S1): 72-78.
TANG Jiajun, TIAN Yukun, SHANG Yanjun, et al. An assessment of water conservation capacity of the forest ecosystem of Gonglongping State-Owned Forest Farm in Guizhou Province[J]. *Forest Resources Management*, 2022(S1): 72-78. (in Chinese with English abstract)
- [31] SUN Z Y, FENG M M, ZHANG X Y, et al. A healthier water use strategy in primitive forests contributes to stronger water conservation capabilities compared with secondary forests[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 851(2): 158290.
- [32] 马维玲, 石培礼, 宗宁, 等. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(4): 478-489.
MA Weiling, SHI Peili, ZONG Ning, et al. Water conservation capacity of forest ecosystems in Taihang Mountain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4): 478-489. (in

- Chinese with English abstract)
- [33] 周玉泉, 姚建忠, 王富, 等. 晋北风沙区杨树退化林分改造对林地土壤蓄水能力的影响[J]. *中国水土保持*, 2022(S8): 37-41.
ZHOU Yuquan, YAO Jianzhong, WANG Fu, et al. Effects of poplar degraded stand transformation on soil water storage capacity of forest land in sandstorm area of North Shanxi[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022(S8): 37-41. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王冶, 薛忠财, 王瑞丰, 等. 1990—2017 年承德市水源涵养功能时空变化格局与影响因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(9): 1138-1146.
WANG Zhi, XUE Zhongcai, WANG Ruifeng, et al. Spatial and temporal patterns of water retention and its influencing factors in Chengde City from 1990 to 2017[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(9): 1138-1146. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal changes and coupling relationship between forestland and water conservation function in Zhangjiakou City of China

WANG Shiqing¹, JI Zhengxin¹, LU Longhui³, DUAN Yaming¹, XU Yueqing^{1,2*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Land Quality, Monitoring and Control, The Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China; 3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Water conservation of forestland is one of the most valuable service functions in the terrestrial ecosystem, especially in arid and semi-arid areas. It is in high demand to explore the evolution of spatiotemporal differentiation patterns in forestland and water conservation functions, as well as their relationship. Tree species structure collocation and forestland area layout can greatly contribute to the water conservation function under reasonable afforestation project management. Taking Zhangjiakou City as an example, the spatiotemporal differentiation characteristics of forestland and water conservation function were qualitatively analyzed using InVEST, and SPSS models, according to the remote sensing image data. The mutual relationship was also quantitatively measured from the two aspects of spatial distribution and quantitative correlation. The results showed that: 1) The distribution of forestland shared outstanding spatial agglomeration. The area of forestland continued to increase from 9 144.99 to 13 650.36 km², with an increase of 4 505.37 km², and 49.27 % from 1990 to 2020. The largest area of broad-leaved forest was obtained from the area ratio, in terms of different tree species. By contrast, there was the smallest area of coniferous forest from the point of view of the growth rate. Among them, the shrubs grew fastest with a growth rate of 95.64 %, whereas, the coniferous forests grew the slowest, with a growth rate of only 36.02%. 2) The water conservation function was high in the east and south, while low in the center and west. The average water conservation decreased first, then increased, and finally decreased. 3) There was a consistent spatial distribution of forestland area and water conservation capacity. Water conservation increased first and then decreased with the increase in forest area. Furthermore, water conservation reached its peak, when the forest area reached 1/2 of the total area. The relationship between water conservation and forest structure was ranked the descending order of the broad-leaved forest > shrub > coniferous forest. 4) The area of economic forest and other forest species should be planted reasonably in the future. Much attention should be paid to the planting of mixed forests and primary forests, in order to realize the coordinated development of socio-economy and ecological protection. In addition, some findings were also needed to further explain: there was no increase in the water conservation function with the increase of forestland area. Therefore, the decision-making on ecological engineering projects can comprehensively consider various ecological service functions in the actual construction, rather than the increase of forestland area. Quantitative analysis can be made to determine the most reasonable forestland area and tree species collocation. In addition, it is very necessary to comprehensively analyze the influencing factors of the water conservation function from the perspectives of natural conditions, social economy, and regional policies, so as to promote the full play of regional water conservation capacity and the construction of water conservation functional areas and ecological environment support areas in Zhangjiakou City, Hebei Province of China.

Keywords: ecology; forestland; ecosystem service; water conservation function; spatiotemporal variation; Zhangjiakou City