

哈尔滨市域水源涵养功能时空演变 与驱动力非线性关系研究

徐嘉¹, 樊秀娟², 张军^{1*}, 曲琛¹

(1. 东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040;
2. 白城市工业园区管理委员会, 吉林 白城 137099)

摘要:人类活动的加剧和极端天气事件的频发导致生态问题日益凸显,水源涵养作为生态循环的关键环节受到显著影响,目前对水源涵养时空演变机制的理解尚未明晰。通过分析哈尔滨市域2000-2020年水源涵养强度的时空演变特征以及驱动力及非线性关系,揭示了研究区水源涵养量的变化规律及其与土地利用类型和社会生态驱动因素之间的复杂关系。结果表明:(1)哈尔滨市域水源涵养量整体呈现先减后增的年际变化规律;(2)耕地与建设用地贡献超80%供给量,耕地受降雨与总体面积调整原因影响供水量呈V型波动,林地随降水增加及保护措施影响供给量稳增;(3)各驱动因子呈现阈值效应与多峰值非线性特征。研究结果可为哈尔滨市水资源管理和保护工作提供科学依据。

关键词:水源涵养;驱动力;非线性关系;哈尔滨市域

中图分类号:X171.1;X321 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)11-0003-9

0 引言

水资源作为维系生态系统服务与人类社会发展的基础性要素,对维持生态平衡、支撑人类社会经济活动和区域可持续发展具有不可替代的作用,其供给能力的时空演变直接影响区域水安全、生态平衡及可持续发展^[1]。水源涵养不仅涉及自然水文循环过程,还与土地利用变化、气候变化及人类活动等变化相互耦合^[2,3],其驱动机制具有显著的非线性与空间异质性特征^[4]。因此,探讨水源涵养的驱动力及其非线性的作用关系,能够探究其影响机制,有助于揭示其背后的科学规律并进行监测与管理。

水源涵养的早期研究聚焦于水源涵养量的定量评估,通过遥感技术、地理信息系统等手段,对区域水源涵养量进行空间表达和时间序列分析^[5-7]。随着研究的深入,学者们开始关注水源涵养的驱动力研究,探讨生态因素、社会因素对水源涵养量的影响^[8]。近年来,水源涵养的驱动机制研究向空间模型过渡。相关研究多基于

回归分析、机器学习等方法,探讨驱动力对水源涵养的影响^[9,10]。然而,现有的水源涵养驱动因素研究多聚焦于对驱动因素的影响程度的静态分析,对动态响应机制仍缺乏系统性认知和影响机制研究,亟需通过综合模型方法揭示其复杂关系^[11]。基于广义加法模型(Generalized Additive Models, GAMs)的非线性分析能够有效解析驱动因素与水源涵养间的动态响应关系,揭示多因素协同作用下的影响机制,为复杂系统的动态模拟提供方法论支持^[12]。

哈尔滨市域作为中国东北典型寒地地区,近年来面临水资源供需失衡、季节性短缺与生态功能退化等多重挑战。农业灌溉需求增长,叠加气候变化引发一系列水源涵养问题。针对上述问题,本研究旨在通过时空演变分析、不同土地利用类型的水源涵养强度分析以及驱动力及非线性关系分析,揭示哈尔滨市域水源涵养量的变化规律及其与土地利用类型和社会生态驱动因素之间的复杂关系。

1 材料和研究方法

1.1 研究区概况

哈尔滨市位于黑龙江省南部,是东北亚地区的中心区域和欧亚大陆桥的重要交通枢纽,也是东北振兴和“一带一路”倡议的关键节点。研究区参考《哈尔滨国土空间总体规划(2020-2035年)》中“一带两屏、一圈两区”的国土空间格局,选取哈尔滨都市经济高质量发展区为研究范围,涵盖道里区、道外区、南岗区、香坊区、平房区、松北区、呼兰区、阿城区、双城区九个行政区,总面积 10196km²。该区域是哈尔滨市人口和经济活动的核心区,承担城市主体供水功能。水源涵养功能受到建设用地扩张和土地利用变化的显著影响,导致区域生态本底面临较大压力。基于其典型的生态脆弱性和国土空间规划资源整合需求,研究区为探讨水源涵养服务及其驱动机制提供了重要实践意义,同时也为类似区域的生态优化与可持续发展提供了科学范式。

1.2 数据来源与预处理

本研究中不同年份的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)的 30m 分辨率数据集;研究区土壤相关数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心 1:100 万世界土壤数据集(<http://www.ncdc.ac.cn>);数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)30m×30m 分辨率数字高程产品,并且进行统一的坐标系处理;气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);中国 1km 分辨率逐月降水量数据集来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),根据年份需求进行逐月叠加计算;归一化植被指数 NVDI 数据来自美国航天局 NASA 的 MODIS13Q1 数据,分辨率为 250m,经过预处理及像元统计得到 NDVI 数据。研究中栅格数据的分辨率统一为 30m,并确保了空间参数的一致性。

1.3 研究方法

1.3.1 水源涵养时空演变分析

水源涵养功能采用 InVEST 模型中产水量模块(Annual Water Yield)来绘制和模拟用于景观水电生产的年平均产水量。该模型基于 Budyko 水热耦合平衡假设计算水源涵养^[13],原理是结合了区域内的土地利用类型、气候条件、土壤含水能力、并以流域为单位基于水量平衡原理进行计算,水源涵养功能在生态系统服务中的作用突出,能够直接体现出水体、植被、土壤之间相互作用所提供的产水量^[14]。

主要计算公式如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_{xj}}{c} = 1 + \frac{PET_{xj}}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{PET_{xj}}{P_x}\right)\omega\right] 1/\omega \quad (2)$$

$$PET(x) = K_c(L_x) \cdot ET_0(x) \quad (3)$$

$$\omega(x) = z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

其中, Y_{xj} 表示年产水量; AET_{xj} 为土地利用类型 j 上对应 x 栅格的实际年平均蒸散发量; P_x 为栅格 x 的年均降雨量; PET_{xj} 为栅格 i 上的潜在蒸散量; w 表示植被可利用含水量。 z 为经验常数; K_c 是植物蒸散系数; $AWC(x)$ 为土壤有效含水量。

土壤有效含水量($AWC(x)$)与植物可用土壤含水量、植物根系深度有关,由土壤质地和土壤有效深度决定,可确定植物生长过程中土壤提供的水量。公式如下:

$$AWC_a = \text{Min}(\text{SoilDepth}, \text{RootDepth}) \times PAWC \quad (5)$$

其中, SoilDepth 表示土壤深度,在模型中表示为植物根系限制层深度; RootDepth 为不同土地利用类型上的植物根系深度; $PAWC$ 代表了土壤中的植物可利用含水量,根据研究区的具体土壤特性进行计算。

根系限制层深度($\text{SoilDepth}, \text{RootDepth}$)是指由于环境的物理环境和化学特征的不同,植物根系能够在土壤的限制中延伸的最大深度。研究

采用联合国粮农组织所提供的参考数值,以及相关参考文献^[15]来对根系限制层进行赋值。不同土地利用类型上的植物根系深度根据哈尔滨市域土地利用数据,将限定系数空间插值到栅格数据中,进行计算。

植物可利用含水量(PAWC)为土壤能够为植物所利用的水含量,如被称为土壤有效含水量^[16]。研究选取周文佐^[17]对东北黑土土壤为植物提供的有效含水量的计算方法来计算研究区植物可利用含水量,计算公式如下:

$$PAWC_a = 54.509 - 0.132S_a - 0.003S_a^2 - 0.055F_a - 0.006F_a^2 - 0.738N_a + 0.007N_a^2 - 2.688C_a + 0.501C_a^2 \quad (6)$$

其中,PAWC_a代表植物可利用水含量;S_a、F_a、N_a分别表示不同地区的砂粒、粉粒以及粘粒的质量百分比含量;C_a表示研究区内有机碳含量。

蒸散系数(K_c)指作物蒸散量的效率,是作物实际蒸散量与作物潜在蒸散量的比值。本研究根据联合国粮农组织中作物的蒸腾系数测定,并根据相关文献^[18,19]进行了修订,设置成研究区所需的蒸腾系数。

1.3.2 水源涵养时空演变驱动力影响分析

基于对水源涵养有可能产生影响的相关因素,结合研究区的具体情况和相关研究,本研究聚焦自然条件对水源涵养的基础性作用,从自然生态方面选择高程、坡度、温度、NDVI四个驱动因子进行分析,深入探究哈尔滨市域水源涵养空间异质性的驱动力。广义加法模型(GAMs)作为一种非参数回归方法,能够有效捕捉因变量与自变量之间复杂的非线性关系^[20],研究利用GAMs模型光滑函数表达三个时期哈尔滨市域水源涵养与驱动因素存在的未知非线性关系,能够灵活地适应数据的局部特征,揭示不同时期水源涵养的时空演变机制及其驱动力的动态变化^[21]。将研究区划分为1000m分辨率的渔网9698个,在渔网中逐年提取水源涵养与各项驱动因子的平均值,采用R 4.3.0软件中“mgcv”探究2000年、2010年、2020年与4种主要驱动因素之间的非线性关系,利用薄板回归样条对应

用于不同社会生态驱动因素的光滑项进行建模^[22],将得到的非线性关系进行可视化表达。

2 结果与分析

2.1 水源涵养量的时空演变分析

2.1.1 水源涵养量的时空变化分析

从探究区的水源涵养空间分布特征图来看(图1a),2000、2010、2020年整体呈现城区中间的水源涵养量高于周围其他地区的情况,主要包括香坊区、道外区东部、南岗区和道里区东部,松花江流域的产水量整体呈现较低的状态,道外区东侧、双城区以及阿城区部分地区呈现出较高的水源涵养量,其中供给量高值主要集中分布在流域上游、中游部分地势较高的区域,对比模型计算得出的研究区实际蒸散量分布特征图(图1b)可知,主城区产水量高的部分实际蒸散量值较小,因为中部建设用地的不透水面导致其蒸散系数偏小,所以整体数值较高,松花江流域的蒸散系数较大,所以产水量明显较低。2000年,研究区水源涵养量在空间上分布较为均匀,其中中心城区的供给量显著高于周边地区,而松花江流域的水源涵养量相对较低。2010年,全区水源涵养量整体减少,空间上呈东南部高、西北部低的格局,主要原因是双城区西南部降水量减少导致西部产水量下降。2020年研究区东部降水量高于西部,这主要也是由于阿城区东南部林地区域降雨量更为充沛,从而显著提升了东部的总体水源涵养量。

分析哈尔滨市域水源涵养量变化特征,其中2000、2010和2020年研究区的栅格平均水源涵养分别为216.655mm、179.014mm和248.950mm;体积供给量分别为219.992×10⁷m³、181.596×10⁷m³、252.199×10⁷m³;整体均呈现出先减后增的产水量年际变化规律,对比研究区的降水量、蒸散量等气象情况,是因为2010前后年份年松花江流域地区内出现极端干旱天气,年度平均总降雨量较小。2000-2010年总产水量减少了38.396×10⁷m³,增幅达到-17.453%;2010-2020

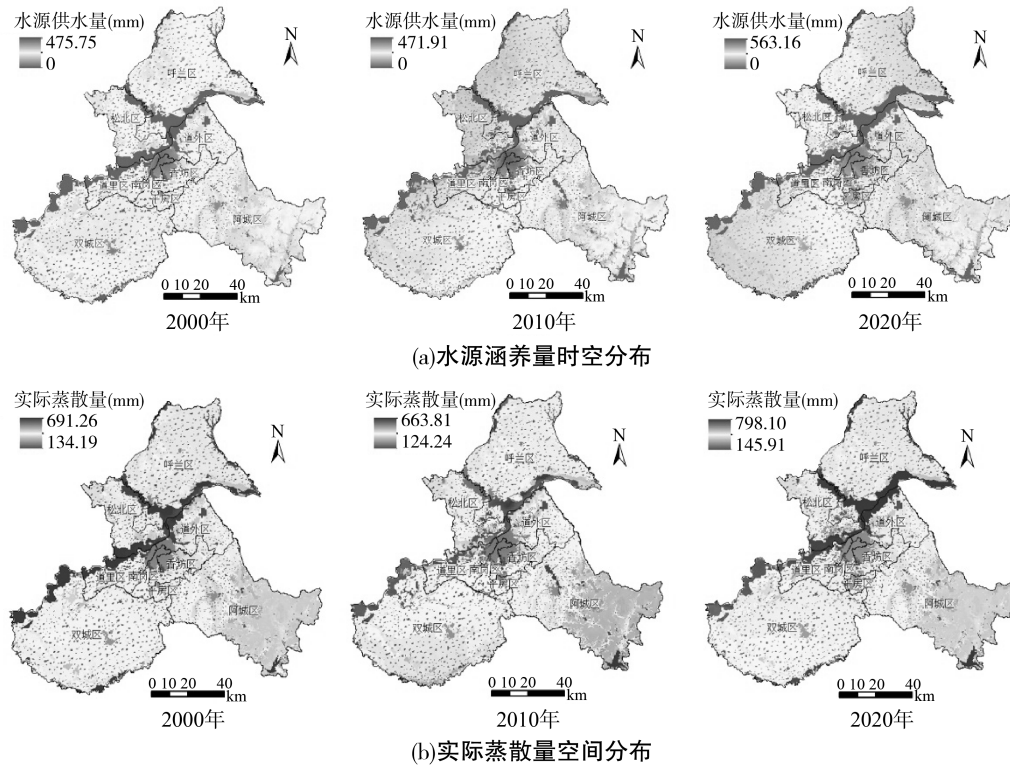


图 1 研究区水源涵养时空分布

年水源涵养量增加了 $70.603 \times 10^7 \text{m}^3$, 增幅达到 38.879%, 但根据研究区的总体情况分析, 2000–2020 年水源涵养总量增加了 $32.207 \times 10^7 \text{m}^3$, 总体呈现上升趋势。

2.1.1 不同土地利用类型水源涵养强度分析

根据哈尔滨市域绿色空间水源涵养统计结果(表 1、表 2), 2000–2020 年不同土地利用类型的水源涵养量呈现显著差异。从栅格平均水源涵养量来看, 2000 年排序为建设用地>耕地>林地>草地>未利用地>水域, 2010 年和 2020 年排序为建设用地>林地>耕地>草地>未利用地>水域, 这一变化主要与耕地和林地数值相近以及二级地类差异密切相关。总产水量排序始终为耕地>建设用地>林地>未利用地>草地>水域, 其中耕地和建设用地作为主要水源涵养类型, 占研究区总供给量的 80% 以上。耕地水源涵养能力总体呈现先减后增趋势, 20 年间总供给量增加 $10.00 \times 10^7 \text{m}^3$ (增幅 6.18%), 其变化主要受降雨量波动及耕地面积调整的双重驱动; 具体而言, 2000–2010 年耕地供给量减少 $39.28 \times 10^7 \text{m}^3$ (降

幅 24.29%), 主要由于耕地内部结构变化及单元栅格水源涵养量减少 69.05mm, 而 2010–2020 年产水量显著回升, 增加 $49.28 \times 10^7 \text{m}^3$ (增幅 40.26%)。林地水源涵养能力小幅提升(增幅 17.70%), 其变化主要受到降水量增加及林地保护措施的共同影响; 草地水源涵养总体保持稳定(增幅 6.93%), 但其空间分布受松花江流域土地利用转化的显著影响, 其中 2000–2010 年草地面积增加导致水源涵养量上升, 而 2010–2020 年部分草地转化为沼泽地则导致供给量小幅下降。水域水源涵养增幅最为显著(82.83%), 主要得益于水体面积变化及蒸散量的动态调整; 建设用地总供给量持续增加(增幅 35.67%), 尽管单位栅格水源涵养量下降, 但其面积扩张抵消了这一负面影响。

2.2 水源涵养量驱动力及非线性关系分析

不同的驱动因子在生态系统服务供需格局的形成中具有不同的作用, 使用 GAM 模型检查每个因素对水源涵养的影响程度, 采用逐步方法构建每个因子的 GAM, 确定水源涵养沿各社会

表 1 研究区水源涵养统计(2000-2020 年)

土地利用类型	栅格平均水源涵养 (mm)			总产水量 ($\times 10^7 m^3$)			土地利用类型占整体产水量比 (%)		
	2000	2010	2020	2000	2010	2020	2000	2010	2020
耕地	225.36	156.32	156.82	161.68	122.40	171.68	72.18	67.04	68.07
林地	196.29	156.56	159.45	24.23	20.50	28.52	10.82	11.23	11.31
草地	191.40	144.92	153.69	3.33	4.33	3.56	1.49	2.37	1.41
水体	8.63	10.36	25.84	0.15	0.14	0.27	0.07	0.08	0.11
建设用地	405.05	309.92	242.71	30.45	30.13	41.32	13.60	16.50	16.38
未利用地	38.42	40.44	63.22	4.15	5.09	6.85	1.85	2.79	2.72

表 2 研究区水源涵养变化特征(2000-2020 年)

土地利用类型	2000-2010			2010-2020			2000-2020		
	栅格平均水源涵养变化量 (mm)	总产水量变化量 ($\times 10^7 m^3$)	总产水量增量比率	栅格平均水源涵养变化量 (mm)	总产水量变化量 ($\times 10^7 m^3$)	总产水量增量比率	栅格平均水源涵养变化量 (mm)	总产水量变化量 ($\times 10^7 m^3$)	总产水量增量比率
耕地	-69.05	-39.28	-24.29%	0.50	49.28	40.26%	-68.55	10.00	6.18%
林地	-39.73	-3.73	-15.40%	2.89	8.02	39.11%	-36.84	4.29	17.70%
草地	-46.48	1.00	30.10%	8.77	-0.77	-17.81%	-37.71	0.23	6.93%
水体	1.73	-0.01	-6.22%	15.48	0.13	94.96%	17.21	0.12	82.83%
建设用地	-95.13	-0.32	-1.05%	-67.21	11.18	37.12%	-162.34	10.86	35.67%
未利用地	2.02	0.94	22.74%	22.78	1.76	34.54%	24.80	2.70	65.14%

生态驱动因素在时间和规模上的变化,其中曲线代表不同年份的水源涵养对驱动因素的响应,曲线阴影区域表示每条线的两个标准误差,具有95%置信区间(图2)。

观察内部结构发现驱动因素的响应变化都表现出非线性轨迹,部分驱动因素具有明显的阈值效应且呈现多峰值波段,其中以温度为代表,其对水源不同年份的水源涵养的影响呈现非线性多峰值上升,且2000年和2010年拟合最高峰值集中在不同的阶段,随年度的不同水源涵养的峰值区逐渐的下降。到2020年没有明显的峰值,并且置信区间的范围也逐渐缩小。分析主要原因在于三个年份的年平均温度逐年升高,更高的温度加快蒸腾减少了水源涵养量;而NDVI值对水源涵养的影响除2000年呈现上升趋势外,

2010年和2020年都呈现了明显的下降趋势,并且随年份变化置信区间范围逐渐减小,此变化和土地利用类型的转变与NDVI的降低具有极大的关系,需要加强管控;高程对研究区内水源涵养的影响在不同年份中较为相似,由于研究区内高程变化相对平稳,其对水源涵养量的直接影响相对较小,三个年份中随着高程的增加,置信区间的范围逐渐扩大,表明在高程较大的地区,水源涵养量的波动范围受到其他多种因素的更大影响;坡度对于水源涵养的影响呈现小幅度的大量波动,水源涵养是由于气候变化和人类活动加剧了地表径流、下渗及土壤持水能力的区域差异,导致坡度较大地区的水源涵养随年份增加呈现更显著的极端波动和置信区间扩大,需要及时的进行检测和控制。

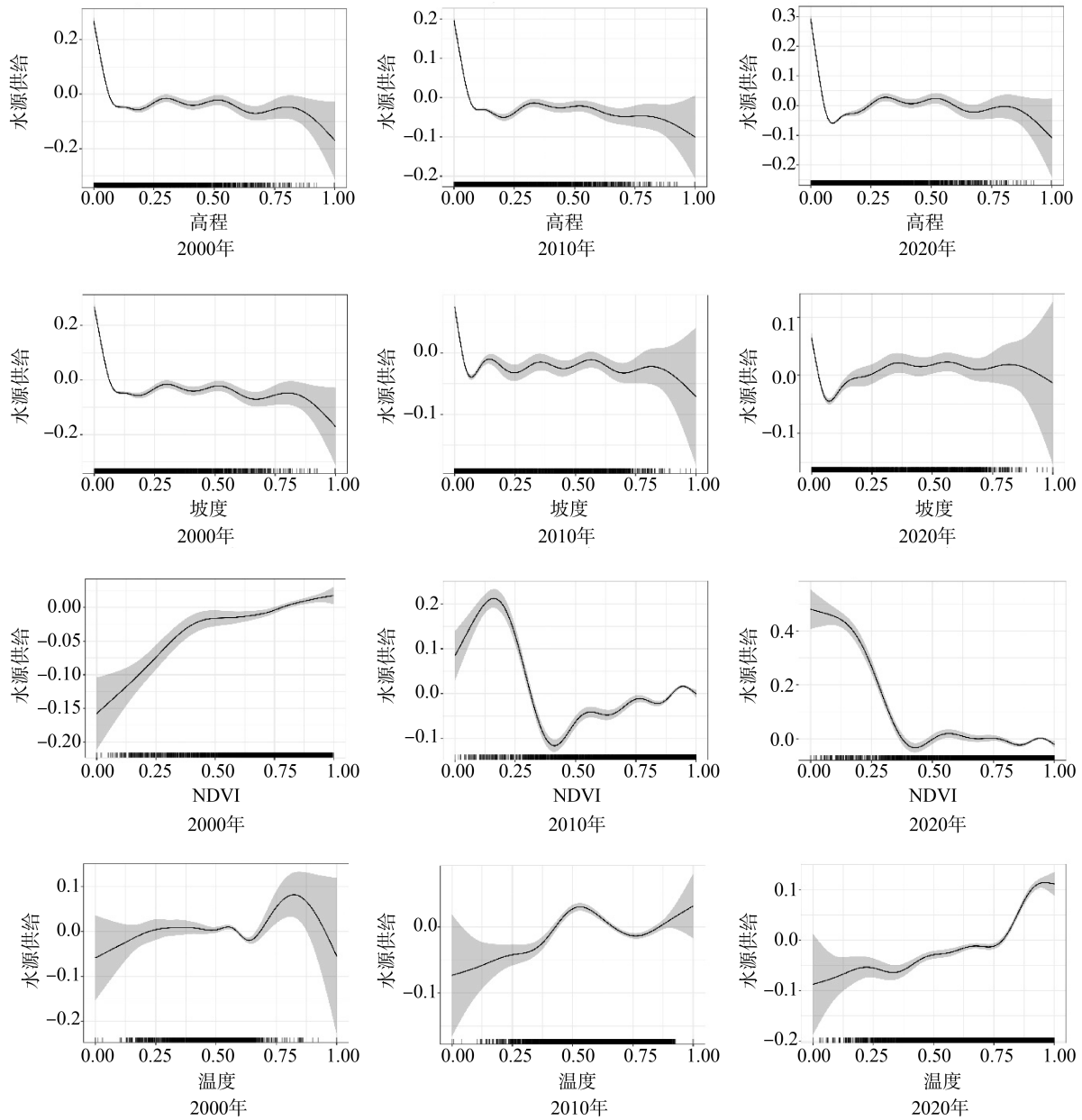


图 2 研究区水源涵养对驱动因素的响应曲线

4 结论与讨论

本文以哈尔滨市域为研究区,计算研究区的水源涵养情况,通过时空演变分析、不同土地利用类型的水源涵养强度分析以及驱动力及非线性关系分析,得出以下主要结论:

(1) 哈尔滨市域水源涵养量时空演变特征显著。研究区水源涵养量整体呈现先减后增的年度变化规律,其中 2000 年至 2010 年受到气候变化的水源涵养量减少,而 2010 年至 2020 年则

由于降雨量增加与土地保护政策实施,水源涵养量显著回升。空间特征表现为城区中心及部分地势较高区域水源涵养量较高,而松花江流域及西部地区则相对较低的特征。

(2) 不同土地利用类型对水源涵养量的影响存在差异。耕地和建设用地是主要的水源涵养类型,占总供给量的 80% 以上。耕地水源涵养量受降雨量波动及耕地面积调整的双重驱动,先减后增;林地水源涵养能力小幅提升,受降水量增加及林地保护措施影响;草地、水域及未利用

地的水源涵养量占比较小,其变化受到土地利用类型转变等因素的共同作用。

(3)水源涵养量受多种社会生态驱动因素非线性影响。温度、NDVI 值、高程及坡度等因素均对水源涵养量产生非线性影响,且部分因素具有明显的阈值效应及多峰值波段。其中,温度升高加快蒸腾减少水源涵养量,NDVI 值降低与土地利用类型转变密切相关,高程对水源涵养量的直接影响相对较小,而坡度较大地区水源涵养量在不同年份出现了一些极端变化,需及时检测和控制。

根据哈尔滨市域水源涵养时空演变规律及驱动机制研究,提出差异化管控策略:(1)实施土地利用分类调控,构建绿色基础设施网络增强雨水滞留能力,补偿水域生态功能。在香坊区、南岗区推广绿色屋顶与透水铺装技术,补偿建设用地扩张导致的蒸散量损失;在双城区和阿城区的耕地集中区实施节水灌溉与生态沟渠技术,缓解降雨波动引发的产水量波动;(2)建立驱动因子阈值管理机制,依据 GAM 模型揭示的温度、NDVI 非线性响应规律,将温度和 NDVI 控制在合理范围区间以内,在松花江流域设置蒸散系数预警阈值,对西部的草原地区中 NDVI 持续下降区域采用植被恢复技术;(3)强化空间分区精准治理,在主城区及东部的高水源涵养功能区域严格水源保护,划定禁止开发红线,限制高耗水产业发展,构建湿地恢复与植被缓冲带技术,强化降雨截留能力;在双城区西部脆弱地区运用地下储水廊道技术,提升干旱年份的水源稳定性。通过耦合土地利用优化与生态工程技术,显著缓解气候变化与城市扩张对水源涵养功能的双重压力。

本研究的结果为未来的水资源管理和保护工作提供了重要的科学依据和实践指导。然而,水源涵养量的变化是一个复杂的过程,包含了多种因素的相互作用。因此,在未来的研究中,在对于生态和人为干扰以及其相互作用关系对水源涵养量的影响方面,应将哈尔滨市统计年鉴(如农业用水量、人口密度和 GDP 等)、土地利用

变迁遥感数据(如城市扩张与耕地退化等)等社会经济因子纳入远景模型,以进行水源涵养功能驱动因素的进一步分析,确保资源的可持续利用和生态环境的健康发展。

参考文献(References):

- [1] 梅怡明,江立芸,孙浩翔,等.基于 InVEST 模型的梁子湖流域水生态系统服务价值评估[J].环境科学与技术,2024,47(11):57-66.
- [2] 赵筱青,李思楠,普军伟,等.云南喀斯特山区国土空间优化分区与管控[J].自然资源学报,2020,35(10):2339-2357.
- [3] 胡文敏,杨睿瀚,贾冠宇,等.长江流域产水功能对土地利用变化的响应及其驱动因素[J].生态学报,2022,42(17):7011-7027.
- [4] Zhu Z, Wang K, Lei M, et al. Identification of priority areas for water ecosystem services by a techno-economic, social and climate change modeling framework [J]. Water Research, 2022, 221: 118766.
- [5] 顾晋怡,李一平,杜薇.基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析[J].水资源保护,2018,34(03):62-67,84.
- [6] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于 InVEST 模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J].生态学杂志,2019,38(12):3789-3799.
- [7] 李怡颖,范继辉,廖莹.基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J].草业科学,2020,37(07):1313-1324.
- [8] 黄欣,彭双云,王哲,等.基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素[J].应用生态学报,2022,33(10):2813-2821.
- [9] Du Y, Bao A, Zhang T, et al. Quantifying the impacts of climate change and human activities on seasonal runoff in the Yongding River basin[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110839.
- [10] Pierrat É, Laurent T A, Dorber M, et al. Advancing water footprint assessments: Combining the impacts of water pollution and scarcity [J]. Science of The Total Environment, 2023, 870: 161910.
- [11] 闫语,秦耀伟,东嘉琪,等.京津冀地区生态系统服务权衡与协同关系及驱动因素分析[J].环境

- 科学学报, 2025, 45(03): 493-506.
- [12] 宋创业, 黄翀, 刘庆生, 等. 黄河三角洲典型植被潜在分布区模拟——以翅碱蓬群落为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(04): 677-685.
- [13] Wang Y, Ji Y, Yu H, et al. Measuring the Relationship between Physical Geographic Features and the Constraints on Ecosystem Services from Urbanization Development[J]. Sustainability, 2022, 14(13): 8149.
- [14] 徐嘉, 许大为, 曲琛. 基于生态系统服务重要性的国土空间生态安全格局研究——以哈尔滨市域为例[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(04): 304-312.
- [15] 欧阳绿茵. 基于 InVEST 模型的环洞庭湖区 LUCC 对生态系统服务的影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [16] 蔡燕, 王会肖. 太行山山前平原土壤有效水动态分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(03): 313-317+322.
- [17] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 25(04): 88-95.
- [18] 田佳玲. 基于植物多样性遥感估测的生态系统服务提升优先区识别研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2022.
- [19] 刘家宏, 刘创, 周晋军, 等. 城镇化和功能疏解对北京市蒸散发的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(12): 1964-1971.
- [20] 杜毅倩, 余国杰, 殷晓洁, 等. 气候变化对冷蒿在我国潜在地理分布影响研究[J]. 生态学报, 2025, 45(04): 1-15.
- [21] Alahuhta J, Ala-hulkko T, Tukiainen H, et al. The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 47-56.
- [22] Shen J, Li S, Liu L, et al. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125193.

作者简介:

第一作者:徐嘉,1997年生,女,吉林白城人,博士,东北林业大学,主要研究方向为城市景观规划与生态系统修复。Email:xj_landscape@nefu.edu.cn;

通讯作者:张军,1971年生,男,哈尔滨人,博士,东北林业大学,教授,主要研究方向为城市规划、建筑设计、健康城市、城市遗产保护。Email:Zhangjun-nefu@nefu.edu.cn

Spatio-temporal Evolution of Water Conservation Function and Nonlinear Relationships of Driving Forces in the Harbin Metropolitan Area

XU Jia¹, FAN Xiujuan², ZHANG Jun^{1*}, QU Chen¹

((1. College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Management Committee of Baicheng City Industrial Park, Baicheng 137099, China)

Abstract: The intensification of human activities and the increasing frequency of extreme weather events have exacerbated ecological problems, significantly affecting water conservation, which plays a crucial role in the ecological cycle. However, the spatiotemporal evolution mechanisms of water conservation remain insufficiently understood. This study investigates spatial and temporal variations in water conservation intensity, as well as the driving forces and their nonlinear relationships, in the Harbin metropolitan area from 2000 to 2020. The findings reveal the changing patterns of water conservation and its complex interactions with land use types and socio-ecological driving factors. The results indicate that (1) the total water conservation in the Harbin area exhibited a trend of first decreasing and then increasing over time; (2) cropland and construction land together contributed more than 80% of the water conservation supply. The water conservation function of cropland showed a V-shaped fluctuation driven by precipitation and land area adjustments, while the water conservation of forest land steadily increased with rising precipitation and the implementation of conservation policies; (3) the driving factors demonstrated threshold effects and nonlinear multi-peak responses. These findings provide a scientific basis for water resource management and ecological protection in Harbin.

Key words: water conservation; driving forces; nonlinear relationships; Harbin Metropolitan Area