

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.052.

王阳, 魏建兵, 程雨露, 等. 浑河上游新宾县土地利用演变对水源涵养能力影响评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 169-176.

WANG Yang, WEI Jianbing, CHENG Yulu, et al. Evaluation of the Impact of Land Use Evolution on Water Conservation Capacity in Xinbin County, Upper Reaches of Hun River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 169-176.

浑河上游新宾县土地利用演变对 水源涵养能力影响评价

王阳¹, 魏建兵¹, 程雨露¹, 郑泓¹, 张钧羿¹

(沈阳大学 区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044)

摘要: [目的] 阐明水源保护区浑河上游新宾县土地利用变化与水源涵养功能的关系, 指导当地或类似地区土地利用和水资源优化管理。 [方法] 基于 ArcGIS 平台, 采用土地利用转移矩阵研究新宾县 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年土地利用变化; 在此基础上, 运用 InVEST 模型评估 1995—2015 年区域及不同土地利用类型的产水功能和水源涵养功能。 [结果] (1) 1995—2015 年新宾县土地利用类型始终以林地和草地为主, 21 年来, 林地、其他用地 (湿地为主)、水域和建设用地的面积均增加, 其中林地面积增加最大, 耕地和草地的面积在减少; (2) 1995—2015 年, 林地、其他用地、建设用地和水域面积的增加来源于耕地和草地; (3) 新宾县多年平均产水量为 $1.564 \times 10^9 \text{ m}^3$, 水源涵养量为 $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 作为重点水源涵养区域, 新宾县平均水源涵养能力 193.62 mm, 多年来呈现波动变化趋势, 产水量的变化与分布、土地利用直接影响着区域的水源涵养量大小; (4) 1995—2015 年不同土地利用类型的水源涵养量变化明显, 不同地类年均水源涵养能力大小依次为林地 > 其他用地 > 草地 > 水域 > 耕地 > 建设用地。 [结论] 林草覆盖率高是该地区维持水源涵养功能的基础。作为新宾县水源涵养总量贡献最大的林地与面积最小却具有极强水源涵养能力的其他用地 (以湿地为主), 应予以特别关注, 同时建设用地的扩展对林草地面积和质量造成的负面影响也要引起注意。

关键词: 土地利用变化; 水源涵养量; InVEST 模型; 浑河上游

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0169-08

Evaluation of the Impact of Land Use Evolution on Water Conservation Capacity in Xinbin County, Upper Reaches of Hunhe River

WANG Yang¹, WEI Jianbing¹, CHENG Yulu¹, ZHENG Hong¹, ZHANG Junyi¹

(Key Laboratory of Eco-Restoration of Regional Contaminated Environment of Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: [Objective] The relationship between land use changes and water conservation function in Xinbin County in water conservation area of upper reaches of Hunhe River was clarified in order to guide the optimal management of land use and water resources in local or similar areas. [Methods] Based on ArcGIS platform, land use transfer matrix was used to study land use changes in Xinbin County in 1995, 2000, 2005, 2010 and 2015; on this base, the InVEST model was applied to evaluate the water production function and water conservation function of the region and different land use types from 1995 to 2015. [Results] (1) From 1995 to 2015, the land use type of Xinbin County had always been dominated by woodland and grassland. In the past 21 years, the areas of woodland, other land (mainly wetland), water bodies and construction land

收稿日期: 2022-05-18

修回日期: 2022-05-29

资助项目: 国家自然科学基金“异质景观流域河岸带土地利用优化及其水环境效应”(41171399), “大型湖库型水源保护区氮素污染景观源-汇机制及空间优化调控”(41771200)

第一作者: 王阳(1996—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为环境可持续发展与规划。E-mail: wysoilsh@163.com

通信作者: 魏建兵(1972—), 男, 山西吕梁人, 教授, 博士生导师, 主要从事景观生态学、区域生态规划与生态修复等领域科研和教学工作。

E-mail: oliver1208@sina.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

had increased, among which the area of woodland had increased the most, and the areas of cultivated land and grassland were decreasing. (2) From 1995 to 2015, the increase of woodland, other land, construction land and water bodies came from cultivated land and grassland. (3) The average annual water yield of Xinbin County was $1.564 \times 10^9 \text{ m}^3$, water conservation capacity was $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$. As a key water conservation area, the average water conservation capacity of Xinbin County was 193.62 mm, showing a fluctuating trend of first decreasing, then increasing and then decreasing over the years. The change and distribution of water yield and land use directly affected the water conservation capacity of the region. (4) From 1995 to 2015, the water conservation capacity of different land use types changed significantly, and the order of average annual water conservation capacity of different land types was woodland > other land > grassland > water area > cultivated land > construction land. [Conclusion] High forest and grass coverage is the basis of water conservation in this area. Special attention should be paid to the forestland with the largest contribution to the total amount of water conservation in Xinbin County and the other land with the smallest area but strong water conservation capacity (mainly wetland). Meanwhile, attention should also be paid to the negative impact of the expansion of construction land on the area and quality of forest and grassland.

Keywords: land use change; water conservation; InVEST model; upper reaches of Hunhe River

随着生态系统服务功能研究的快速发展,生态系统水源涵养功能也受到了人们的关注,并成为国内外资源环境领域研究的热门话题之一^[1]。水源涵养是陆地生态系统重要生态服务功能之一,具有复杂的动态特征,是生态系统在一定的时空条件和各种因素(如气象、地形、土壤、植被等)的影响下,对区域水循环进行调节的过程。随着人们对生态系统与水之间关系的深入了解,生态系统水源涵养功能的内涵也逐渐变得丰富。早期关于水源涵养功能的研究主要集中在其对河流流量的影响上,如今人们对水源涵养功能表现形式的理解也更加全面,即从单一的水源供给扩展到水土保持、净化水质、调节径流等,研究对象也从重点为森林扩展到具备涵养水源能力的景观区域,人们逐渐认识到了生态系统水源涵养功能的重要性。关于水源涵养量的研究之前大多是通过建立生态水文监测站,采用水量平衡法、降水储存量法、综合蓄水能力法、土壤蓄水能力法、年径流量法等传统计量方法,通过实测数据进行计算,这些方法准确率较高,但对于缺乏长期监测资料的更广大地区,其应用受到了限制。随着水源涵养机理和传统测算方法研究的逐渐成熟,将传统测算方法和计算机、统计建模等现代信息技术相结合构建出的水源涵养模型成为一种经典的水源涵养功能计量方法,如 SWAT 模型、InVEST 模型和 TerrainLab 等模型^[2]。模型能够对水源涵养过程进行分析以及模拟预测,具有计算精度高、适用于大尺度及动态分析等特点。

InVEST 模型产水模块依据水量平衡原理,综合考虑降水、蒸散、土地利用类型以及植被可利用水等参数计算产水量,并考虑土壤渗透性和地表径流等物

理过程来对生态系统水源涵养量进行估算。由于具有动态模拟、参数调整灵活、评价结果空间可视化等特点,已被广泛用于国内外的生态系统服务评估中。近些年来关于 InVEST 模型的研究主要围绕研究区域产水量和水源涵养量及时空变化(埃塞俄比亚^[3]、中国西北地区^[4]、三江源区^[5])、价值评估(如韩国^[6]、中国岷江上游^[7]、太湖流域^[8])、未来情景预测(美国^[9]、泰国^[10]、扬河流域^[11]、闽三角城市群^[12])、模型验证与完善(如英国^[13]、韶关市^[14])等方面开展相关工作,针对东北地区水库型水源保护区,特别是辽东山区相关的系统研究还较为少见。

浑河作为中国七大水系之一辽河的最大支流,其上游是国家九大集中式饮用水源地之一大伙房水库的集水区,为沈阳、大连、抚顺、营口等城市的 2 300 多万人提供工业及居民生活用水,水库上游区域的生态环境保护状况对于水库的水量和水质维护起着至关重要的作用。国家和地方政府一直重视水库上游的植被修复和水环境治理,特别是“十一五”水专项实施以来,这个区域基于水质改善的研究和工程不断完善,但系统的水源涵养功能研究还较为缺乏。其中,抚顺市新宾县是水库上游的主要汇水区之一,丰富的森林资源和特殊的区位优势决定了其成为辽宁省的重点水源涵养区域和绿色生态屏障区域,以新宾县为例开展区域产水量和水源涵养量及时空变化研究,对于保障中下游辽宁中部城市群的工农业生产和人民生活乃至对全省经济能否实现可持续发展都有重要的意义。因此本文通过气象、地形等参数,借助 InVEST 模型对新宾县水源涵养功能

进行定量评估,以期能为新宾县乃至辽东山区水源保护的水利建设、生态修复等工程提供研究思路和数据支撑。

1 研究区概况

新宾县隶属辽宁省抚顺市,总面积 4 287.38 km²,下辖共 15 个乡镇,地处辽东山地丘陵北部。东与吉林省通化市、柳河县接壤,南与本溪县、桓仁县为邻,西与抚顺县搭界,北与清原县毗壤。地理坐标为北纬 41°14′10″—41°58′50″,东经 124°15′56″—125°27′46″。地貌类型属中低山区,是辽宁省地势最高的县之一,总体

地势东高西低,全县的平均海拔为 498 m,高差 800~1 000 m。山地占总面积的 72.9%,丘陵占 15.9%,平地占 8.9%,河流沼泽占 2.3%。境内为寒冷湿润的北温带大陆季风气候,年平均降雨量 770 mm,年均气温 4.7℃。森林覆盖度高,产业以林业和农业为主。

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所使用的数据主要包括气象数据、蒸散数据、地形数据、土壤数据、流速系数等,具体来源及处理见表 1。

表 1 数据来源与处理

数据类型	来源及处理
气象数据	中国气象数据网获得新宾县及其周围气象站点 1995—2015 年日降水数据,运用 ArcGIS 软件的 Kriging 插值法对站点数据进行空间插值
DEM 数据(30 m 分辨率)	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
土地利用数据	地球大数据共享服务平台(https://data.casearth.cn/),主要用于土地利用转移矩阵的描述和分析
蒸散数据	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/),通过空间分析获得
流域及子流域边界	在 ArcGIS 中对 DEM 数据进行水文分析生成
土壤数据	来自世界土壤数据库 HWSD 利用空间掩膜提取
流速系数	参考模型参数表数据及相关文献获得

2.2 InVEST 模型水源涵养模块

InVEST 水源涵养模型综合考虑了不同土地利用类型下土壤渗透性的差异,结合地形以及地表粗糙度对地表径流的影响,以栅格为单元对不同地块的水源涵养能力进行定量评价。模型包括两个子模块:产水模块和水源涵养模块。其中产水模块依据水量平衡原理进行估算,产水量等于某栅格单元的降雨量减去实际蒸散发后的水量,包括地表产流、冠层截留量、枯落物持水量和土壤蓄水量。

(1) 产水模块

$$Y_x = (1 - \frac{AET_x}{P_x}) \times P_x \quad (1)$$

式中: $Y_{(x)}$ 表示栅格单元 x 的年均产水量; $AET_{(x)}$ 表示栅格单元 x 的年实际蒸散量; $P_{(x)}$ 表示栅格单元 x 的年均降水量。

土地利用/覆被类型的植被蒸散发 $\frac{AET_x}{P_x}$,通过 Budyko 水热耦合平衡假设公式计算^[15]:

$$\frac{AET_x}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{(x,j)}}{1 + \omega_x R_{(x,j)} + 1/R_{(x,j)}} \quad (2)$$

式中: $R_{(x)}$ 表示栅格单元 x 的无量纲干燥指数,它是潜在蒸散量与降水量的比值; $\omega_{(x)}$ 为自然气候条件下表示土壤性质的一个无量纲非物理参数,计算方法如下:

$$R_x = \frac{K_C \times ET_{0x}}{P_x} \quad (3)$$

$$\omega_x = Z \cdot \frac{AWC_x}{P_x} \quad (4)$$

式中: K_C 为作物蒸散系数; $ET_{0(x)}$ 表示栅格单元 x 的参考蒸散量; Z 为表征降水特征的一个经验常数,数值在 1 到 30 之间。Budyko 曲线理论表明,当 Z 值较大时,或者在干旱指数非常高或非常低的区域,模型对 Z 的敏感性较低,计算方法如下:

$$Z = 0.2N \quad (5)$$

式中: N 表示年均降水事件数,基于中国气象数据网 1995—2015 年日降水数据集的基础上,统计了研究区 21 年来的降水总数,然后将 21 年均降水次数赋值于 N ,从而计算出季节参数。

$AWC_{(x)}$ 为土壤有效含水量(mm),值由土壤质地和土层深度决定,计算公式为:

$$AWC_x = \min(\text{soil_depth}, \text{root_depth}) \times PAWC \quad (6)$$

式中: soil_depth 为土层深度; root_depth 为根系深度; $PAWC$ 为植被可利用水量(mm),计算方法如下: $PAWC = 54.509 - 0.132 \times \text{Sand} - 0.003 \times (\text{Sand})^2 - 0.055 \times \text{Silt} - 0.006 \times (\text{Silt})^2 - 0.738 \times \text{Clay} + 0.007 \times (\text{Clay})^2 - 2.688 \times \text{OM} + 0.501 \times (\text{OM})^2$

式中: Sand 表示土壤砂粒含量(%); Silt 表示土壤粉粒含量(%); Clay 表示土壤黏粒含量(%); OM 表示土壤有机质含量(%),通过公式计算出植物可利用含

水量后,除以土层深度得到0到1之间的分数。

(2) 水源涵养量计算。在用 InVEST 模型计算出年产量后,综合考虑地形,土壤渗透性以及流速系数来计算出水源涵养量。该水源涵养量是降水除去蒸散和地表径流后渗入地下的水量。计算公式如下:

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{\text{velocity}}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_s}{300}\right) \times Y_x \quad (8)$$

式中:WR 表示水源涵养量(mm);velocity 表示流速系数;TI 表示地形指数,由(9)式计算; K_s 表示土壤饱和导水率(mm/d),根据土壤质地、土壤容重等数据通过 SPAW 软件算出。

$$TI = \lg\left(\frac{\text{Drainage area}}{\text{soil_depth} \times \text{percent_slope}}\right) \quad (9)$$

式中:Drainage area 表示集水区栅格数量;soil_depth 表示土层深度(mm);percent_slope 表示百分比坡度。

2.3 地理探测器

地理探测器认为如果某个自变量对因变量有重要影响,那么它们的空间分布在某种程度上应具有关联^[16],在基于此种假设的基础上,为定量研究地类因

子对水源涵养的影响情况,使用地理探测器中的因子探测模块研究水源涵养的空间分异性,该模块用来研究自变量即因子对因变量的影响程度,其结果用解释力 q 与显著程度 p 值来表示。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

1995—2015 年新宾县土地利用类型面积见表 2,以林地和草地为主,两者占总土地面积的 97.5%,其次是耕地、建设用地、水域、其他用地,面积比例分别为 1.27%,0.78%,0.21%,0.05%,其中其他用地包括裸地和湿地,湿地占主要部分。

21 年来,各地类的数量和结构均有不同程度的变化。林地、其他用地、水域和建设用地的面积都有所增加,其中林地面积增加最大,为 21.89 km²,但增幅仅为 0.6%。其他用地面积增幅最大,从 1995 年的 0.16 km² 增加至 2015 年的 4.72 km²,增幅为 2 853.56%。水域和建设用地,增幅分别为 73.9%,72.5%。耕地和草地的面积在减少,减少面积分别为 5.71 km²,43.18 km²,降幅分别为 9.9%,5.7%。

表 2 新宾县土地利用类型面积及其占比

土地利用类型	1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/km ²	占比/%								
耕地	57.41	1.34	69.42	1.62	51.97	1.21	42.06	0.98	51.70	1.21
林地	3435.26	80.15	3512.6	81.96	3567.83	83.25	3489.25	81.41	3457.15	80.66
其他用地	0.16	0.01	1.52	0.04	2.11	0.05	1.72	0.04	4.72	0.11
草地	762.19	17.78	664.37	15.50	620.50	14.48	705.35	16.46	719.01	16.78
水域	6.50	0.15	7.48	0.17	9.52	0.22	10.46	0.25	11.30	0.26
建设用地	24.33	0.57	30.46	0.71	33.91	0.79	37.01	0.86	41.97	0.98

从土地利用转移矩阵(表 3)中可以看出,1995—2015 年各类土地利用类型有转出、转入,变化以耕地、林地以及草地为主,在转出方面,林地面积转出 130.7 km²,其中的 97%转为了草地,耕地面积转出 32.44 km²,其中 75.8%转为了草地,草地面积转出 195.09 km²,其中 77.5%转为了林地,12.6%转为了耕地,由此可见,耕地与林地这两者与草地存在着较大的相互转移。在转入方面,有 26.73 km²的土地转为耕地,其中以草地贡献最大,占比高达 92.1%;林地转入面积为 152.59 km²,其中 99.1%来自于草地;建设用地转入面积为 17.64 km²,其中草地占比 82.8%;水域转入面积为 5.84 km²,其中 54%来自于草地,33.2%来自于耕地;其他用地转入面积为 4.65 km²,主要来自于耕地和草地。总体而言,耕地与草地的新增部分不足以弥补损失,因此耕地与草地面积减少;林地新增部分是损失面积的 1.2 倍,因此林地面积总体呈增加状态;其他用地与水域的新增部分分别是损失面积的 51 倍、5.6 倍,因此其

他用地与水域的面积增加;建设用地多年来只有新增,没有转出,因此建设用地面积一直在增加。

1995—2015 年土地转移矩阵分析表明,耕地和草地面积呈减少状态,其中,耕地主要转化为草地,草地主要转化为林地,建设用地的扩张使得草地面积有所减少,且水域面积的增加也主要来源于耕地和草地,耕地与草地的转出与林地、水域、建设用地的转入呈现出吻合状态。土地转移矩阵定量分析了 21 年来各土地利用类型面积的变化及增加的来源和减少的去向,从空间上对新宾县土地变化机理和利用方式进行了直观反映,对今后新宾县土地资源的合理规划以及资源保护等有一定的参考价值。

3.2 水源涵养功能评估

3.2.1 水源涵养时空变化 1995—2015 年新宾县多年平均产水量为 1.564 × 10⁹ m³,其中 2010 年产水量达到最大值,为 2.94 × 10⁹ m³,最低值出现在 2000 年,为 4.4 × 10⁸ m³,这种产水的变化情况与降水量有

着明显的关系,由于降水量的减少,1995—2000 年的产水量降幅也高达 81%,多年产水量总体呈先减后

增再减的波动变化趋势,总体为减少的变化趋势,平均每年减少 $7.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ (表 4)。

表 3 1995—2015 年土地利用转移矩阵

km²

1995 年	2015 年							
	耕地	林地	其他用地	草地	水域	建设用地	总计	转出
耕地	24.97	1.17	2.14	24.59	1.94	2.60	57.41	32.44
林地	2	3304.56	0.67	126.88	0.72	0.43	3435.27	130.7
其他用地	0.02	0	0.07	0.05	0.02	0	0.16	0.09
草地	24.61	151.24	1.47	567.1	3.16	14.6	762.19	195.09
水域	0.1	0.12	0.37	0.39	5.45	0.01	6.5	1.05
建设用地	0	0	0	0	0	24.33	24.33	0
总计	51.7	3457.15	4.72	719.01	11.3	41.97	4285.85	
转入	26.73	152.59	4.65	151.91	5.84	17.64		
变化	-5.71	21.89	4.57	-43.18	4.8	17.64		

表 4 1995—2015 年不同土地利用类型产水量和水源涵养量

地类	产水量/ 10^8 m^3					水源涵养量/ 10^8 m^3				
	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
耕地	0.39	0.11	0.23	0.35	0.13	0.002	0.0003	0.0009	0.0009	0.0003
林地	17.5	3.16	10.7	22.8	5.2	8.9	1.6	5.5	11.7	2.7
其他用地	0.001	0.003	0.01	0.02	0.01	0.0001	0.00003	0.00009	0.00009	0.00005
草地	5.1	1.03	2.6	5.8	1.7	0.15	0.02	0.07	0.16	0.04
水域	0.032	0.007	0.03	0.07	0.02	0.0005	0.0001	0.0004	0.0009	0.0001
建设用地	0.23	0.11	0.23	0.41	0.2	0.0002	0.00003	0.0003	0.0002	0.00007
总量	23.2	4.4	13.8	29.4	7.4	9.1	1.6	5.5	11.8	2.7

根据产水量结果,再根据地形指数等参数计算出研究区水源涵养量,可知研究区单元平均水源涵养量为 193.62 mm,平均水源涵养总量为 $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,21 年来水源涵养量的变化趋势与产水量变化一致,呈现出先减后增再减的趋势(图 1—4),其中 1995—2000 年水源涵养量的变化较为剧烈,降幅达到 82.4%,2000 年的水源涵养量也达到了最低值,为 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,水源涵养量的最高值出现在 2010 年,为 $1.18 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

多年来新宾县水源涵养量空间分布具有一致性,在气候、土地覆被和地形等因素的综合影响下,研究区水源涵养量呈现出自西北向东南增加的空间分布特征,高值区主要分布在东南地区以及西南地区的平顶山镇,主要原因为东南地区海拔较高,在高森林覆盖率的背景下人为活动较少,并且森林生态系统对水分的拦截和存储能力较强,因此水源涵养量较高;而西北地区海拔低,随着城市化进程加快,建设用地面积逐年增加,而其储水能力差且蒸散发较高,因此水源涵养量较低。其中 1995 年平均水源涵养能力为 351.4 mm,水源涵养能力高值介于 363~729 mm,大部分地区水源涵养能力都在 230 mm 以上。2005 年平均水源涵养能力为 176.3 mm,大部分地区的水源涵养能力都在 138 mm 以上,整体介于 0~483 mm。

2015 年相较 2005 年,平均水源涵养能力减少 91.4 mm,大部分地区的水源涵养能力介于 68~104 mm。从表 4 可以明显看出新宾县水源涵养量的主要贡献为林地,且产水量的变化与分布对区域水源涵养量有着直接影响,多年来由于用地类型以及产水量在年际间的变化,使得水源涵养量的变化也十分明显,21 年来,水源涵养量平均每年减少 $3.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

3.2.2 不同地类的水源涵养功能分析 利用 ArcGIS 统计分析工具,计算出不同地类的单元水源涵养量以及水源涵养总量,结果见表 5。

研究区不同地类单元水源涵养量依次为:林地>其他用地>草地>水域>耕地>建设用地。林地由于土壤孔隙度较大,对土壤结构有明显改善,且林地面积很大,因此其水源涵养能力最强;耕地、建设用地水源涵养能力均很低。水源涵养总量依次为:林地>草地>耕地>水域>其他用地>建设用地。草地的水源涵养能力较强,且所占面积较大,因此水源涵养总量较大;虽然其他用地的单元水源涵养量略高于草地,但由于其所占面积很小,因此水源涵养总量远小于草地;耕地的单元水源涵养量小于水域,然而其水源涵养总量反而大于水域,也是由于耕地面积较大所导致的,可见水源涵养总量的大小与各种地类面积有很大关系。

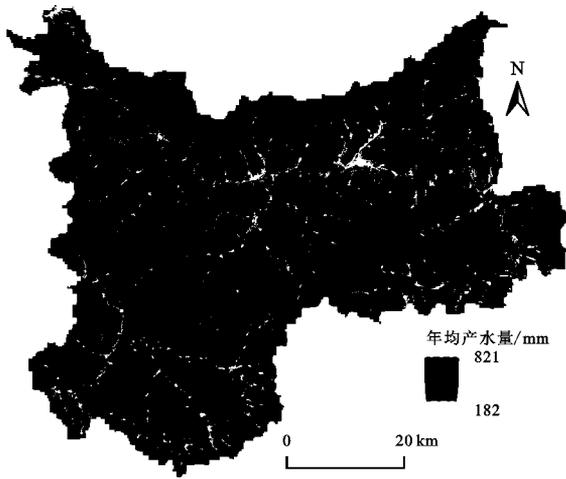


图 1 年均产水量空间分布

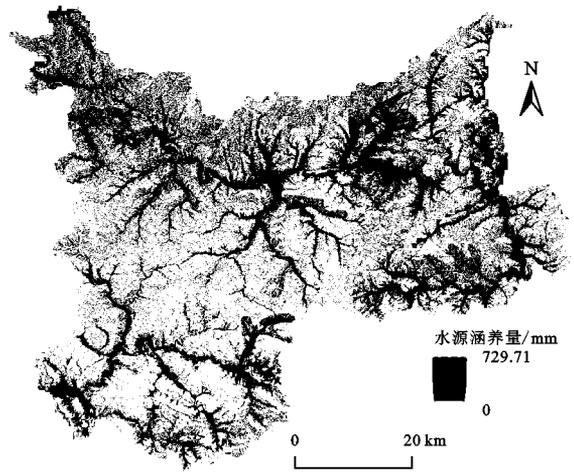


图 2 1995 年水源涵养能力空间分布

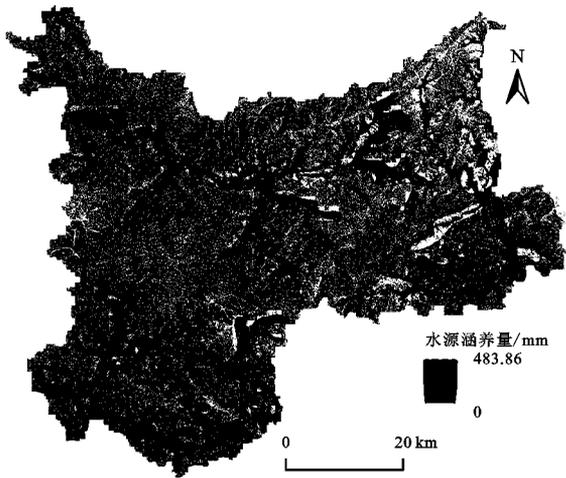


图 3 2005 年水源涵养能力空间分布

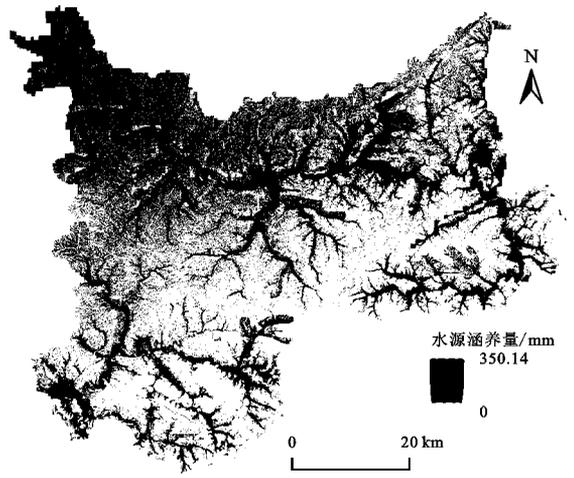


图 4 2015 年水源涵养能力空间分布

表 5 不同地类水源涵养量

类别	耕地	林地	其他用地	草地	水域	建设用地
单元水源涵养量/mm	1.68	174.22	14.40	12.51	4.75	0.46
水源涵养总量/ $10^8 m^3$	0.001	6.1	0.0003	0.087	0.0004	0.0002

3.3 驱动因素分析

运用地理探测器分别研究 1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年土地利用因子对水源涵养空间分异性的影响程度,以解释力 q 值来表示,结果

见表 6。从表中得知,多年来 q 值始终稳定在 0.75 以上,均值高于 0.8,最高可达到 0.89,且 p 值始终为 0,即十分显著(<0.05),因此进一步说明土地利用与新宾县水源涵养功能紧密相关。

表 6 土地利用因子探测结果

因子	1995 年		2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		均值	
	q	p										
土地利用	0.7692	0.000	0.8578	0.000	0.7876	0.000	0.8964	0.000	0.8376	0.000	0.8297	0.000

4 讨论

(1) 通过对土地利用类型时空变化特征进行分析,有助于了解区域水源涵养量的变化及其驱动因素。多年来新宾县主要土地利用类型中的林地与草地呈现出负相关关系,在草地面积增长的同时也伴随着林地面积的减少。作为新宾县最主要的土地利用类型,林地面积始终在 80% 以上,它的利用变化受诸多因

素影响:1995—2005 年期间,新宾县政府施行退耕退草还林以及封山育林政策,因此耕地与草地面积减少,林地面积大幅增加,高达 $132 km^2$ 。2005—2015 年,随着人工种草以及退耕还草政策的实施,草地面积有所增加。虽然县政府一直在实行造林工程,但这段时间林地面积仍然有所减少,主要有两个原因:一方面,人口的大幅增加以及经济的快速增长超出了森林生态系统承载力,再加上乱砍滥伐、资金投入不足等问题导致林地质量

严重下滑;另一方面,国家制定“耕地保护红线”政策来对耕地进行保护,而新宾县近年来不断在完善基础设施建设,例如高速公路和移动通讯基站的新建以及对水库进行的除险加固等一系列工程,占用的对象主要为林地,因此林地面积逐年减少,生态效益也随之降低。对于新宾县而言,水源涵养的主要来源为林地,随着林地、草地、水域面积的增长,水源涵养量也随之增加;而随着耕地面积的增加,水源涵养量却减少,因此,在遵循“耕地保护红线”政策的同时,新宾县可根据实际情况继续实施封山育林以及退耕还草等生态建设工程,并在此基础上加大林地管理的资金投入,可以借助3S技术,对林地资源进行定期监测,对非法破坏与林地征占等案件进行调查。

(2) 21年来林地面积净增 22 km^2 ,而2015年林地水源涵养总量却仅是1995年的0.3倍,主要因为2015年的降水量明显偏少,仅是1995年的0.6倍。此外可能也与龄组结构不合理有关,多年来新宾县天然林和成熟林面积不断减少,中幼龄林面积比重过大,单一的经营方式使得森林质量不高,而通常情况下水源涵养能力与林龄呈正相关,因此可通过天然更新和择伐等措施来优化林分,构建以接近自然状态且呈现出混交、复层、异龄等为结构特征的森林分布,从而实现生态效益最大化。

(3) 不同土地利用类型水源涵养能力差别较大,土地利用类型主要通过影响土壤理化性质等下垫面因素,从而影响水源涵养量。1995—2015年新宾县土地利用以林地和草地为主,占总面积的97.5%,其次是耕地、建设用地、水域、其他用地。不同土地利用类型多年平均产水量大小依次为建设用地>其他用地>耕地>草地>林地>水域,而多年平均水源涵养量的大小依次为林地>草地>耕地>水域>其他用地>建设用地,其中林地和水域的产水量低于耕地和建设用地,而林地的水源涵养量却高,水域的水源涵养量却相对较低,主要是因为林地和水域的蒸散大,建设用地和耕地的蒸散小导致的,此外也与水域面积小有关。相关研究结论与刘景红^[17]、黄菁^[18]等对浑河中上游、张家口地区的研究,王治等^[19]对武烈河流域评估,Ochuodho等^[20]在美国肯塔基州的研究,以及顾晋飴等^[21]对太湖流域的水源涵养能力结果基本相似,这也再次说明了新宾县作为重点水源涵养区,退耕还林还草政策是适用的。

(4) 多年来,以湿地为主的其他用地增幅最大,主要有以下几方面原因:第一,湿地加强了保护,如长岭子省级湿地公园以及猴石、和睦国家森林公园的创建;第二,实施了湿地生态建设,如苏子河源头生态湿地建设,

第三,改变了粗放的传统散牧方式,积极推行牛、羊舍饲圈养,在封山育林区和新植幼林地内禁止放牧。在不同地类水源涵养量分析中,虽然其他用地面积最小,但其单元水源涵养量却仅次于林地,可知其他用地具有强大的水源涵养能力,因此应加快现有的湿地试验区建设,推进退耕还湿从而提高生态效益。

(5) 新宾县多年平均产水量为 476.6 mm ,多年平均水源涵养总量为 $6.2\times 10^8\text{ m}^3$,平均水源涵养能力为 193.62 mm 。产水量和水源涵养量都呈现出先减后增再减的波动变化趋势,水源涵养量的变化及分布与产水量有着直接关系。1995—2015年,水源涵养量在空间分布上具有一致性,水源涵养量从西北向东南递增。与国内其他地区相比,新宾县的平均水源涵养能力(193.62 mm)与该区平均降水量(770 mm)的比值为25.1%,都江堰^[22]为21.2%,甘肃白龙江流域^[23]为5.6%~11.9%,西南金沙江流域^[24]为10.8%,甘肃黑河流域^[25]约为45.7%,辽宁省^[26]为9.5%~22.2%,说明新宾县的平均水源涵养能力与都江堰较为接近,高于辽宁省大部分地区,进一步定量说明该地区作为辽宁省水源地加强保护的重要性。

(6) InVEST模型产水模块基于水量平衡原理对产水量进行计算,在区域和流域尺度具有良好的动态评估效果,可广泛用于大尺度生态系统服务评估、水土保持评价和水源涵养功能评估等。由于该模型忽略了地下水对结果的影响,且有研究^[27]表明,土壤理化性质变化也会对区域的水源涵养功能造成影响,加之生物物理表参数主要通过模型参数表与相似气候地区的文献获得,在一定程度上会产生评估误差,对研究结果的准确性有一定影响,该模型的应用需要收集本地区的特征参数,并期望未来通过参数实测等途径进一步改进与完善。

5 结论

通过对浑河上游典型湖库型水源保护区新宾县21年来各地类的数量与变化进行分析,并采用InVEST模型评估新宾县及各地类的产水量与水源涵养量时空变化特征,得出以下主要结论:

(1) 1995—2015年新宾县土地利用类型始终以林地和草地为主,两者占总土地面积的97.5%,林草覆盖率高是该地区维持水源涵养功能的基础。21年来,各土地利用类型的数量和结构均发生了不同程度的变化,建设用地的扩展对林草地面积和质量造成的负面影响要引起注意,从面积数量和空间直观表示上掌握区域土地利用变化的特征和方向,有利于当地的土地管理和资源保护。

(2) 新宾县多年平均产水量为 476.6 mm, 年均水源涵养总量为 $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年均水源涵养能力为 193.62 mm, 多年来产水量和水源涵养量呈先减后增再减的波动变化趋势, 降水与用地类型的变化都会对水源涵养产生影响。其中不同地类年均水源涵养量的大小依次为林地 > 其他用地 > 草地 > 水域 > 耕地 > 建设用地。

(3) 作为新宾县水源涵养总量贡献最大的林地与面积最小却具有极强水源涵养能力的其他用地(以湿地为主), 应予以特别关注。对于林地, 在加大造林力度的同时, 也应考虑对林分进行优化; 对于以湿地为主的其他用地, 应构建湿地保护体系, 并在保证耕地数量的同时实施退耕还湿政策, 从而实现生态与经济效益的最大化。

参考文献:

- [1] Thevs N, Beckmann V, Akimalieva A, et al. Assessment of ecosystem services of the wetlands in the Ili River Delta, Kazakhstan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(1):1-12.
- [2] 侯晓臣, 孙伟, 李建贵, 等. 森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1):121-127.
- [3] Aneseyee A B, Soromessa T, Elias E, et al. Evaluation of water provision ecosystem services associated with land use/cover and climate variability in the Winike Watershed, Omo Gibe Basin of Ethiopia[J]. *Environmental Management*, 2022, 69(2):367-383.
- [4] Yang X, Chen R, Meadows M E, et al. Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China[J]. *Water Supply*, 2020, 20(3):1035-1045.
- [5] 潘韬. 基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1):183-189.
- [6] Young C J, Don L S. Assessment of economic value of ecosystem service by using InVEST model in South Korea[J]. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2017, 8(12):815-818.
- [7] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3):577-585.
- [8] 陈骏宇, 刘钢, 白杨. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估[J]. *水利经济*, 2016, 34(2):25-29.
- [9] Hoyer R, Chang H. Assessment of freshwater ecosystem services in the Tualatin and Yamhill basins under climate change and urbanization[J]. *Applied Geography*, 2014, 53:402-416.
- [10] Srichaichana J, Trisurat Y, Ongsomwang S. Land use and land cover scenarios for optimum water yield and sediment retention ecosystem services in Klong U-Tapao Watershed, Songkhla, Thailand[J]. *Sustainability*, 2019, 11(10):2895-2908.
- [11] 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 等. 基于 InVEST 模型的未来土地利用变化对水源涵养功能的影响: 以杨溪河流域为例[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(15):67-70.
- [12] 王保盛, 陈华香, 董政, 等. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(2):484-498.
- [13] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569:1418-1426.
- [14] 王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):381-388.
- [15] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1):23-31.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
- [17] 刘景红, 郑晓, 樊俊美, 等. 基于 SWAT 模型的浑河中上游水源涵养服务价值评估[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11):3905-3912.
- [18] 黄菁, 范继辉, 何晓蓉. 基于 InVEST 模型的张家口地区水源涵养功能研究[J]. *山地学报*, 2021, 39(3):327-337.
- [19] 王冶, 薛忠财, 王琳, 等. 承德市武烈河流域水源涵养功能的时空特征[J]. *草业科学*, 2021, 38(6):1047-1059.
- [20] Bai Y, Ochuodho T O, Yang J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102:51-64.
- [21] 顾晋飴, 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(3):62-67.
- [22] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(3):789-797.
- [23] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(7):1728-1743.
- [24] 刘娇, 郎学东, 苏建荣, 等. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(20):8099-8111.
- [25] 张福平, 李肖娟, 冯起, 等. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(6):1321-1329.
- [26] 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.
- [27] 熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等. 若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. *生态学报*, 2011, 31(19):5780-5788.