

基于PLUS-InVEST模型的河北省承德市 水源涵养功能预测

吕铁冰¹, 苏伟¹, 贾梓琦¹, 胡宝月², 刘宏权¹, 付银环³, 马素英³

(1.河北农业大学 城乡建设学院, 河北保定 071000;

2.河北农业大学 渤海学院, 河北沧州 061100; 3.河北省水利科学研究院, 河北石家庄 050057)

摘要: [目的] 模拟预测不同情景下河北省承德市的水源涵养功能, 为优化该市国土空间布局, 提升复合生态系统服务能力及保障京津冀水资源安全提供科学支撑。[方法] 基于PLUS-InVEST耦合模型, 设置耕地保护、生态保护、自然发展、城市扩张4种情景, 对承德市2028、2033和2038年土地利用变化及水源涵养功能进行预测与分析。[结果] ①承德市“三生”空间冲突将持续影响土地利用变化, 其中森林面积总体稳定, 但草地除生态保护情景外普遍遭受侵占并呈退化趋势; 城市扩张情景下不透水面面积显著增加。②未来不同情景下, 承德市水源涵养功能分布格局保持高度稳定, 但总量对土地利用变化响应敏感。除生态保护情景外草地水源涵养量持续下降, 城市扩张情景下森林水源涵养功能被侵占, 不透水面水源涵养量异常升高。[结论] 耕地、林地及草地是承德市水源涵养功能的主体, 承德市面临着草地退化与城市无序扩张的双重压力。未来应在严格保护森林生态系统的前提下, 统筹协调耕地保护与草地恢复, 严格控制不透水面的无序扩张。

关键词: InVEST模型; PLUS模型; 土地利用变化; 多情景模拟; 水源涵养预测; 河北省承德市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0344-11

中图分类号: X171.1, P333, S714.7

文献参数: 吕铁冰, 苏伟, 贾梓琦, 等. 基于PLUS-InVEST模型的河北省承德市水源涵养功能预测[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 344-354. Lyu Tiebing, Su Wei, Jia Ziqi, et al. Prediction of water conservation function in Chengde City of Hebei Province based on PLUS-InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 344-354.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.027

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.027

Prediction of water conservation function in Chengde City of Hebei Province based on PLUS-InVEST model

Lyu Tiebing¹, Su Wei¹, Jia Ziqi¹, Hu Baoyue², Liu Hongquan¹, Fu Yinhuan³, Ma Suying³

(1.College of Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University,

Baoding, Hebei 071000, China; 2.Bohai College, Hebei Agricultural University, Cangzhou,

Hebei 061100, China; 3.Hebei Province Academy of Water Resources, Shijiazhuang, Hebei 050057, China)

Abstract: [Objective] The water conservation function of Chengde City of Hebei Province was simulated and predicted under different scenarios, in order to provide scientific support for optimizing the territorial spatial layout, enhance the capability of composite ecosystem services, and ensure water resource security in the Beijing-Tianjin-Hebei region. [Methods] Based on the PLUS-InVEST coupled model, four scenarios were established-cultivated land protection, ecological protection, natural development, and urban expansion-to predict and analyze land use and water conservation function in Chengde City in 2028, 2033, and 2038. [Results] ① The conflicts among production-living-ecological spaces continued to influence land use changes in Chengde City. The area of forest land remained generally stable, while grassland, except under the ecological protection scenario, was

收稿日期: 2025-07-25

修回日期: 2025-10-20

采用日期: 2025-10-20

资助项目: 河北省自主培养人才科研专项“永定河景观蓄水河段生态功能提升关键技术研究”(ZY2024006); 河北省省级水利科技计划项目(HBST2024-02); 河北省“三三三人才工程”项目(B2024003); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2021B02)

第一作者: 吕铁冰(1999—), 男(满族), 河北省承德市人, 硕士研究生, 研究方向为水源涵养功能。Email: L17732888505@163.com。

通信作者: 苏伟(1985—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 副教授, 主要从事水环境治理及水生态修复方面的研究。Email: lgsw@hebau.edu.cn。

widely encroached upon and showed a trend of degradation. Under the urban expansion scenario, the area of impervious surfaces increased significantly. ② Under future scenarios, the distribution pattern of water conservation function in Chengde City remained highly stable, but the total amount was sensitive to land use changes. Except for the ecological protection scenario, the water conservation amount of grassland continued to decline. Under the urban expansion scenario, the water conservation function of forest land was encroached upon, while the water conservation amount of impervious surfaces increased abnormally. [Conclusion] Cultivated land, forest land, and grassland are the main contributors to water conservation function in Chengde City, which faces dual pressures of grassland degradation and unregulated urban expansion. In the future, while strictly protecting forest ecosystems, it is necessary to coordinate the protection of cultivated land with grassland restoration and to strictly control the unregulated expansion of impervious surfaces.

Keywords: InVEST model; PLUS model; land use change; multi-scenario simulation; water conservation prediction; Chengde City of Hebei Province

在全球气候变化及快速城市化背景下,水资源安全已成为制约区域可持续发展的关键因素。其水源涵养功能作为生态系统服务的重要组成部分,在地下水补给、调节径流、净化水质等方面具有不可替代的生态价值^[1]。河北省承德市地处燕山—太行山生态屏障核心区,是京津冀“三北”防护林体系的重要节点和滦河、潮白河等河流的发源地,承担着为北京、天津两大城市提供饮用水源的重任,其水源涵养能力直接关系到京津冀城市群的水资源安全与生态协同发展^[2]。然而,近年来在气候变化加剧与土地利用转型的双重压力下,该区域生态系统结构和功能面临显著扰动,亟需科学量化其水源涵养功能的时空演变规律并预测未来趋势。

水源涵养功能是一个多学科交叉领域,包括水文学、土壤学、生态水文学、环境学等,对于水源涵养功能的研究也各不相同^[3]。目前对于水源涵养功能的研究主要分为试验研究及模型模拟两方面。水源涵养功能的试验研究主要围绕关键地类结构与土壤水文特性两大维度展开。在植被类型影响机制方面,斛如媛等^[4]、李琳等^[5]学者量化林木冠层截留、枯落物层蓄渗等过程;农海勤等^[6]在土壤结构调控机制研究中,基于环刀法、水分特征曲线等试验,量化不同土壤的水源涵养功能。在模型模拟领域,早期统计模型(如水量平衡法)因参数简化难以揭示生态过程机制,而过程机理模型的兴起实现了突破,InVEST^[7-8]、SWAT等^[9-10]工具通过耦合气象、土壤、植被及地形等多源数据,能够可视化地量化水源涵养服务。然而,目前对于水源涵养功能的研究仍有不足:①试验研究受限于研究对象的局限性、站点稀疏性和山地环境异质性,难以支撑区域尺度的连续评估;②主流模型常静态化处理土地利用变化(如InVEST依赖历史土地覆被数据),缺乏对人文驱动因子(如政策干预、城镇扩张)与自然过程动态反馈

的协同模拟。本研究创新性集成InVEST水源模块与PLUS土地利用情景模拟器,通过耦合CA-Markov算法与多目标决策框架,将未来用地转型的驱动机制内生,从而构建“自然—社会”双向反馈的预测体系,弥补传统方法在动态性、机制性及政策关联性方面的不足,并以承德市为例,基于2013、2018和2023年土地利用数据,运用PLUS模型预测其在2028、2033和2038年的土地利用变化。结合气象与土壤数据,运用InVEST模型进一步评估未来不同时期的水源涵养功能并划分功能区,分析其变化规律及驱动因素。研究结果对深化山区生态屏障功能认知、服务国家生态文明战略需求具有重要理论和实践意义。

1 研究区概况

承德市位于河北省东北部(40°12′—42°37′N, 115°54′—119°15′E),地处燕山—太行山生态屏障核心区,是京津冀重要的水源涵养功能区和生态安全屏障。该区总面积约39 410 km²,地貌以山地、丘陵为主(所占比例超80%),地势西北高,东南低,海拔范围200~2 118 m。区内水系发达,是滦河、潮河、辽河等多条河流的发源地或流经地。植被覆盖率高(森林覆盖率约60%),主要分布天然次生林和人工林,以油松、落叶松、樟子松及桦树为主,土壤类型以棕壤、褐土为主,具有较强的水源涵养能力。承德市年均降水量500~700 mm,降水季节分布极不均衡,主要集中在夏季。6—9月的降雨量可占全年总量70%左右。承德市平均温度6~10℃,季节温差大。年均相对湿度约50%~65%,无霜期较短,约120~160 d。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究数据来源及处理方法详见表1。

表 1 数据来源及处理
Table 1 Data sources and processing

分类	数据类型	数据来源及处理
基础地理数据	土地利用	中国年度土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD) ^[11] 。
	DEM	DEM数据(30 m)(www.gscloud.cn/)
	土壤数据	世界土壤数据库(HSWD)(https://gaez.fao.org/pages/hwsd)
气象/水文数据	气象数据	国家青藏高原数据中心(http://data.yepdc.ac.cn) ^[12-13]
	植物可用含水量	基于土壤数据库 ^[14] ,由以下公式得到: $PAWC = 54.509 - 0.132 \text{ Sand} \% - 0.003(\text{Sand} \%)^2 - 0.055 \text{ Silt} - 0.006(\text{Silt} \%)^2 - 0.738 \text{ Clay} \% + 0.007(\text{Clay} \%)^2 - 2.688 \text{ OM} \% + 0.501(\text{OM} \%)^2$
水文参数	Z参数	Zhang系数 ^[15] 是一个经验常数,典型值在1到30之间。参照前人对承德地区研究成果,取值2.7 ^[2,16] 。
	流速系数	参照他人研究文献 ^[16] 及InVEST手册
社会经济	人口密度	LandScan数据集(https://landscan.ornl.gov)
	城乡居民区分布	全球城乡居民区分布栅格数据(1 km) ^[17]
	夜间灯光数据	夜间灯光数据(NPP-VIIRS) ^[18]
路网数据	公路(高速、国道、省道、县道)	利用 Open Street Map 获取
	铁路	利用 Open Street Map 获取
	水系	利用 Open Street Map 获取

2.2 土地利用预测模型

PLUS(patch-generating land use simulation)模型^[19]是结合土地扩张分析策略(LEAS)及多类型随机种子的精细化土地模拟工具,适用于复杂情景下的土地利用动态预测^[20-21]。其中LEAS模块可捕捉土地变化过程中非线性关系并生成概率转移矩阵。CARS模块为的传统CA模型改进而来,基于LEAS生成的概率转移矩阵动态模拟土地利用的变化。

通过设置不同情景下土地利用概率转移矩阵,PLUS模型能深入了解土地扩张的驱动因素,精确预测出未来不同情景模式土地利用变化趋势^[21]。参考《承德市国土空间总体规划(2021—2035年)》《承德市土地利用总体规划(2009—2020年)》,针对当前“三生”空间冲突问题分别设置耕地保护、生态保护、自然发展、城市扩张4种情景。

(1)耕地保护情景。选取2013—2023年未变化的耕地为长期稳定耕地,坡度小于6°的耕地为优质耕地;设立耕地保护红线制度,确保耕地面积不低于红线标准。概率转移矩阵的设置依据与原则:依据规划中的强制性条款,原则上限制耕地向不透水面和裸地转移。参考承德市历史土地利用转化速率^[22],对耕地因撂荒或水蚀转化为草地、水体的概率进行中等强度抑制(设定为减小40%),以体现遏制耕地流失的政策导向。同时,为落实耕地“占补平衡”政策,依据《承德市土地整治规划》,对裸地等未利用地开发为耕地的可能性给予高强度激励(设定为增加50%),模拟土地整治工程的优先开展。

(2)生态保护情景。设置围场红松洼国家保护

区、滦河上游、河北茅荆坝、河北塞罕坝、河北雾灵山、天津八仙山为自然保护区,禁止区域内林地、草地向其他土地利用类型进行转移。对于保护区外的区域,概率转移矩阵的设置依据为控制城市发展对生态空间的侵蚀,对林地、草地向不透水面转化的概率进行普遍性限制(设定为减少20%),此数值反映了在发展与保护间取得的平衡。由于水体对于水源涵养的核心作用及其转化的不可逆性,对水体转化为不透水面的概率施加更严格的抑制(设定为降低30%),以体现对河湖蓝线的特殊保护。

(3)城市扩张情景。该情景模拟在经济发展先导向下的土地利用变化。概率转移矩阵的设置依据:不透水面一旦形成便具有极强的利用刚性,因此将其向其他地类转移的概率进行高度抑制(设定为减少30%),以符合其实际特性。同时为反映城市化过程中土地需求的扩张,将其他地类(尤其是耕地、草地)转化为不透水面的概率整体提升(设定为增加20%)。该参数的设定参考了历史高速发展时期的转化趋势^[23],并假设在宽松的土地供应政策下,各类用地转为建设用地的阻力均显著减小。

(4)自然发展情景。不考虑任何政策情景约束,保持2013—2023年变化速率进行预测。

采用kappa系数及FoM系数进行模型精度验证,其计算公式为

$$\text{kappa} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (1)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^k (a_i \cdot b_i) \quad (2)$$

$$FoM = \frac{B}{A+B+C+D} \quad (3)$$

式中: P_o 为观测一致性, 即整体精度; P_e 为期望一致性, 即随机分类所期望的一致性; a_i 为第 i 类真实像元数占总像元数的比例; b_i 为第 i 类模拟像元数占总像元数的比例; k 为类别总数。 A 为命中; B 为误报; C 为漏报; D 为错误类型。

kappa 系数范围在 $-1 \sim 1$, 但实际值在 $0 \sim 1$, 接近 1 表示高度一致性, 当 $kappa > 0.6$ 即认为具有实质一致性, $kappa > 0.75$ 则表明具有较高一致性; FoM 系数值越高表明动态预测效果越好, 但通常以超过 0.2 作为模型可靠的重要阈值^[24]。

2.3 产水量及水源涵养量计算

2.3.1 产水量模型

InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 模型是由美国斯坦福大学自然资本项目 (natural capital project) 开发的一套开源工具, InVEST 模型产水量模块的核心思想是 Budyko 水热耦合平衡及水量平衡公式^[25]。其计算公式为

$$Y_x = (1 - \frac{E_{a,x}}{P_x}) \times P_x \quad (4)$$

式中: Y_x 为产水量 (mm); P_x 为年降水量/mm; $E_{a,x}$ 为年实际蒸散量 (mm)。年实际蒸散量对于植被类型土地利用及非植被类型土地利用采取两种不同的方式, 植被类型计算公式为

$$\frac{E_{a,x}}{P_x} = 1 + \frac{E_{p,x}}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{E_{p,x}}{P_x} \right)^{\omega_x} \right]^{\frac{1}{\omega_x}} \quad (5)$$

$$E_{p,x} = k_{c,l_x} \cdot E_{r,x} \quad (6)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{AWC(x)}{P_x} + 1.25 \quad (7)$$

$$AWC(x) = \min(d_{root,x}, d_{layer,x}) \cdot PAWC \quad (8)$$

非植被类型计算公式为:

$$E_{a,x} = \min(k_{c,l_x} \cdot E_{r,x}, P_x) \quad (9)$$

式中: $E_{p,x}$ 为潜在蒸散量 (mm); k_{c,l_x} 为土地利用 l_x 的蒸散系数; $E_{r,x}$ 为参考蒸散量 (mm); ω_x 为表征自然气候, 土壤特性的非物理参数; Z 为季节常数。

2.3.2 水源涵养量计算

水源涵养功能是指生态系统在一定时间及空间内过截留降水, 调节径流, 延缓水分释放的能力, 水源涵养量的计算需要在产水量的基础上, 通过地形指数、流速系数及土壤饱和导水率做进一步修正, 计算公式为

$$WC = \min(1, 249/V) \times \min(1, 0.9 \times T_1/3) \times \min(1, K/300) \times Y \quad (10)$$

式中: V 为流速系数; T_1 为地形指数; K 为土壤饱和导水率 (mm/d); Y 为产水量 (mm)。

3 结果及分析

3.1 基于 PLUS 模型承德市土地利用分布的模拟及预测

基于承德市 2013 和 2018 年土地利用数据利用 PLUS 模型对承德市 2023 年土地利用进行预测, 通过模型 Validation 模块将预测结果与 2023 年实际土地利用情况进行验证。由验证结果可知, PLUS 模型的整体精度为 0.88, kappa 系数为 0.79, 表明模型在承德市土地利用预测上具有较高的预测一致性和可靠性。图 1 为承德市 2028, 2033 和 2038 年不同情景下土地利用类型空间分布情况。

由图 2 可知, 2023—2038 年耕地保护情景下, 耕地面积增加 11.95% ($7.45 \times 10^8 \text{ m}^2$), 草地面积减少 11.34% ($9.12 \times 10^8 \text{ m}^2$), 不透水面面积增加 13.32% ($1.01 \times 10^8 \text{ m}^2$); 生态保护情景下, 耕地扩张受到抑制, 耕地面积下降 4.11% ($2.56 \times 10^8 \text{ m}^2$), 森林、草地、水体面积均有所上升。自然发展情景下, 草地、水体仍是主要转出对象, 面积分别减少 6.57% ($5.28 \times 10^8 \text{ m}^2$), 2.10% ($1.10 \times 10^6 \text{ m}^2$); 城市扩张情景下, 不透水面面积增加 38.50% ($2.91 \times 10^8 \text{ m}^2$), 生态用地、耕地均受到抑制。4 种情景下, 林地面积一直较为稳定, 增长率基本维持在 0.2%~0.3%; 裸地始终维持转出状态。耕地保护、生态保护、自然发展 3 种情景下, 不透水面增长率较为稳定, 在城市扩张情景下突增至 38.50%。耕地面积在除生态保护情景下, 均保持增长状态。草地面积在生态保护情景略微有所增长, 其余情景均为下降状态。

图 3 为 2023—2038 年土地利用转移矩阵弦图。耕地保护情景下耕地呈现“转入量显著大于转出量”特征, 转入总量达 $9.09 \times 10^9 \text{ m}^2$ (其中 91.2% 来自草地), 而生态保护情景转入量仅 $1.11 \times 10^9 \text{ m}^2$ (99.9% 来自不透水面), 但转出量达 $3.67 \times 10^9 \text{ m}^2$ (57.8% 转为不透水面)。不透水面扩张表现出明显情景差异: 城市扩张情景新增 $4.10 \times 10^9 \text{ m}^2$ 中 51.4% 侵占耕地, 自然发展情景中耕地贡献率更高达 66.0%。草地系统转化呈现双向特征, 生态保护情景下 58.2% 转为林地, 耕地保护情景下 90.0% 转化为耕地。水体转化以不透水面侵占为主 (城市扩张情景占 56.0%)。特别值得注意的是, 不透水面向耕地的逆向转化仅出现在政策干预情景 (耕地保护 $7.70 \times 10^8 \text{ m}^2$, 生态保护 $1.11 \times 10^9 \text{ m}^2$), 在生态保护情景下, 林地面积增加主要来源于草地转化。裸地虽转化量级最小 ($4.00 \times 10^5 \text{ m}^2 \sim 6.00 \times 10^5 \text{ m}^2$), 但转出率高达 96.5%, 表明其在系统中极易发生转移。

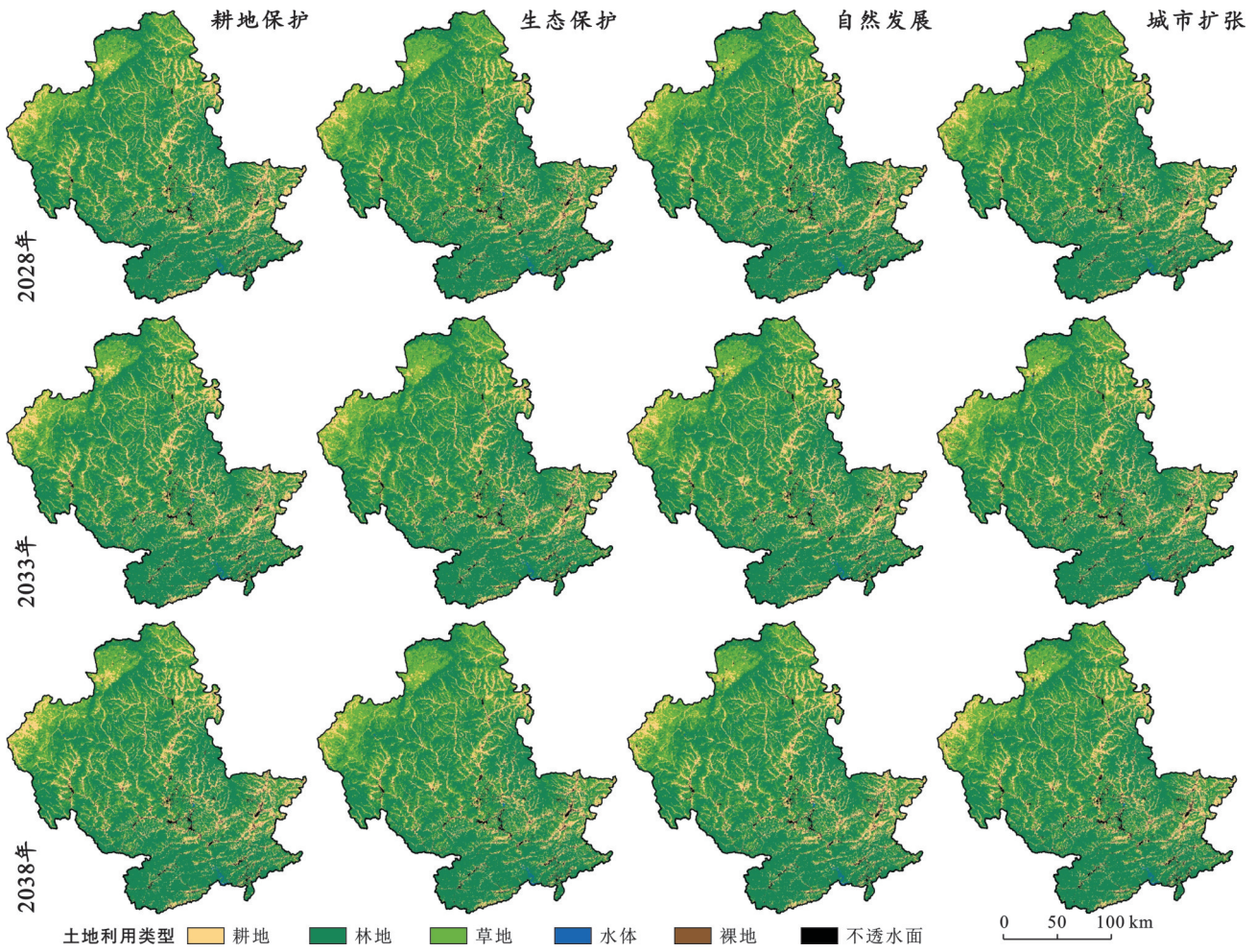


图 1 承德市 2028, 2033 和 2038 年不同情景下土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use under different scenarios in Chengde City in 2028, 2033 and 2038

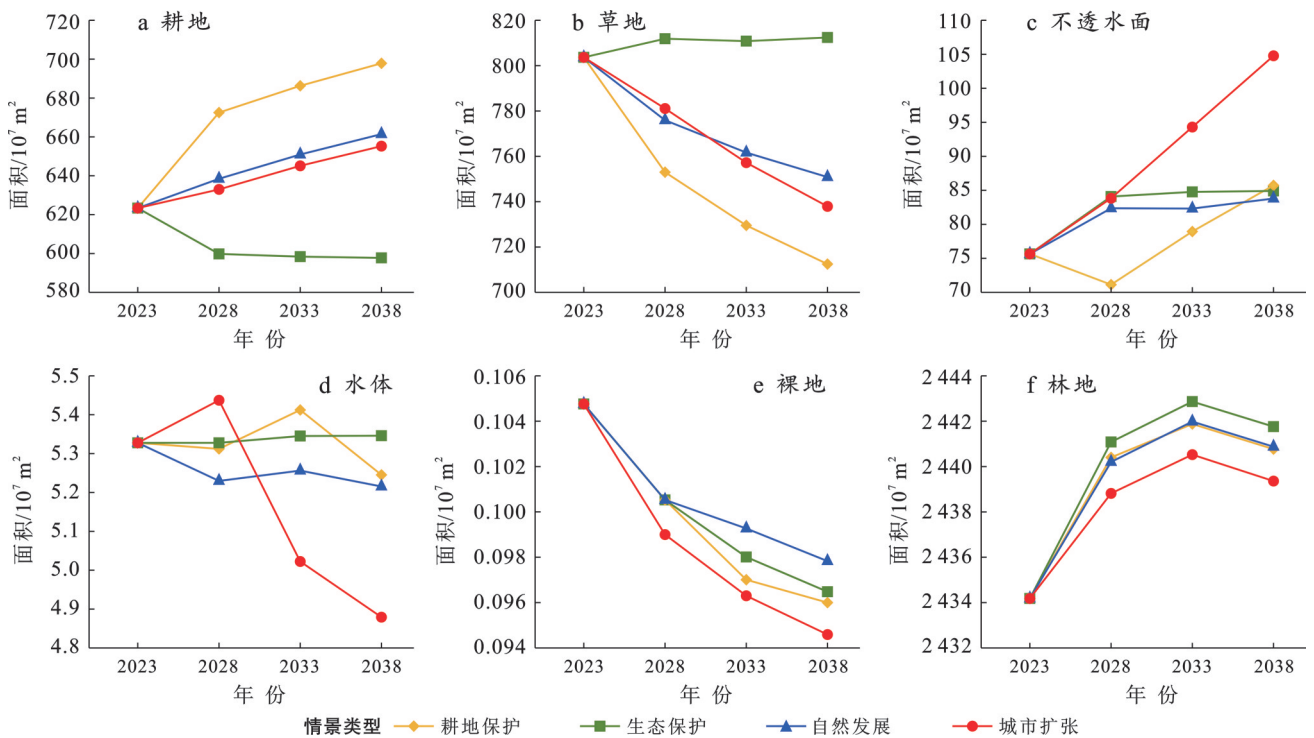


图 2 承德市不同情景下土地利用面积变化

Fig.2 Changes in land use area under different scenarios in Chengde City

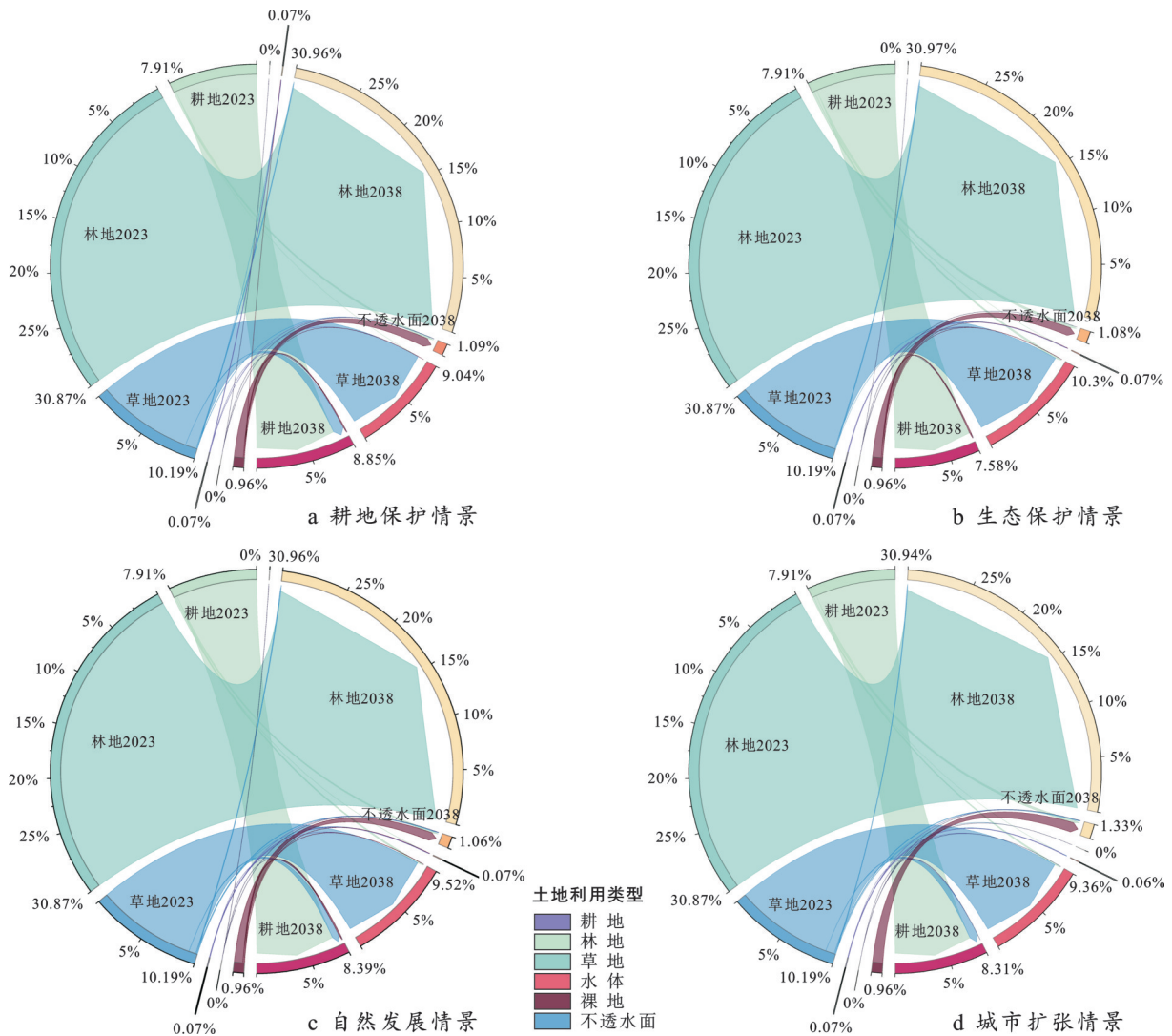


图 3 承德市 2023—2038 年土地利用转移矩阵弦图

Fig.3 Chord diagrams of land use transfer matrix in Chengde City from 2023 to 2038

3.2 驱动因子对土地利用变化的影响

在 PLUS 模型中,各驱动因子的贡献度以其计算值为直接依据:贡献度越大,排名越靠前,表明该因子对相应地类的驱动作用越强。研究发现各驱动因子对不同土地类型贡献度存在显著差异(表 2)。自然地理因子(坡向、坡度、DEM)及夜间灯光数据在耕地、林地、草地扩张的因子中位列前四,是耕地、林地及草地变化的主要影响因子。耕地主要分布在平缓(坡度)、向阳(坡向)的区域,与夜间灯光(人类活动强度)数据呈正相关,与海拔呈负相关。林、草地的分布与夜间灯光的关系为负相关,通常灯光值低的地方林、草地多;在坡度较陡、海拔较高的区域由于人类活动较少,分布更加广泛。不透水面的扩张中自然地理因子(坡度、DEM)和社会经济因子(夜间灯光、距村镇距离)贡献度远高于其他因子。不透水面的扩张与人类经济活动(夜间灯光)、地形条件(平缓的坡度和低海拔)以及距离现有居民点的距离密切相关。裸地的扩张则与特定

人类活动(高速建设和夜间灯光)强相关,不透水面及交通基础设施的建设会直接导致沿线裸地的增加。

3.3 水源涵养功能预测

利用 InVEST 模型计算产水量,并基于水源涵养修正公式计算 2013,2018,2023,2028,2033 和 2038 年不同情景模式下水源涵养量。取不同情景下 2028,2033 和 2038 年平均水源涵养量,在 ArcGIS 中基于自然断点法进行三级分类,将承德市水源涵养功能分为强、中、弱 3 个等级,划分结果如图 4 所示。结果显示不同情景下,承德市水源涵养功能分区基本一致。承德市水源涵养强功能区主要集中在围场满族蒙古族自治县西北部,丰宁满族自治县北部,平泉市、宽城满族自治县、兴隆县及滦平县北部。以上地区普遍植被覆盖度较高,生态功能较强,土壤持水性较好,故拥有较高的水源涵养功能。水源涵养中功能区呈现承德市中间较少,两边发散的特点,主要分布于水源涵养强功能区边缘地带。承德市中部隆化

县、承德县、承德市区为水源涵养弱功能区。该地区分布有大量山地、不透水面、工矿用地,土壤持水性显著下降,故不利于水源涵养。

表 2 土地利用驱动因子贡献度
Table 2 Contribution degrees of driving factors to land use change

项目	贡献度					
	耕地	林地	草地	水体	裸地	不透水面
坡向	0.115	0.082	0.131	0.02	0.010	0.041
坡度	0.139	0.128	0.109	0.027	0.080	0.126
DEM	0.105	0.101	0.093	0.175	0.031	0.129
夜间灯光	0.115	0.110	0.121	0.267	0.292	0.181
人口	0.064	0.073	0.071	0.065	0.046	0.054
村	0.102	0.105	0.081	0.104	0.100	0.153
镇	0.06	0.066	0.057	0.043	0.066	0.079
高速	0.067	0.062	0.061	0.036	0.170	0.051
国道	0.046	0.046	0.042	0.022	0.067	0.036
省道	0.046	0.060	0.056	0.013	0.042	0.033
县道	0.042	0.051	0.056	0.048	0.018	0.043
铁路	0.042	0.054	0.066	0.013	0.045	0.034
水系	0.056	0.062	0.055	0.167	0.033	0.041

承德市未来水源涵养量在不同情景下表现出显著差异(图 5),耕地、林地和草地是承德市水源涵养功能的主体,贡献了承德市 95% 以上的水源涵养量。从变化趋势来看,耕地的水源涵养量与林地、草地呈相反态势。在 4 种情景中,生态保护情景下耕地水源涵养量最低(平均值 $1.88 \times 10^8 \text{ m}^3$),林地(平均值 $5.30 \times 10^8 \text{ m}^3$)、草地(平均值 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3$)水源涵养量最高。在耕地保护情景下,草地水源涵养量(平均值 $2.76 \times 10^8 \text{ m}^3$)最低,耕地水源涵养量(平均值 $2.04 \times 10^8 \text{ m}^3$)最高。值得注意的是除生态保护情景外,草地的水源涵养量在其余情景中均呈逐年下降趋势。而林地水源涵养量在其余 3 种情景中都较为相似且相对稳定,但在城市扩张情景下,于 2038 年出现了明显下降。不透水面的水源涵养量在城市扩张情景中出现显著上升,在 2033—2038 年有所回落,而在其他 3 种情景中则基本保持一致。水体及裸地的水源涵养量虽然在 4 种情景中均表现为逐年下降的趋势,但由于二者在总量中占比较小,其变化对整体的影响有限。

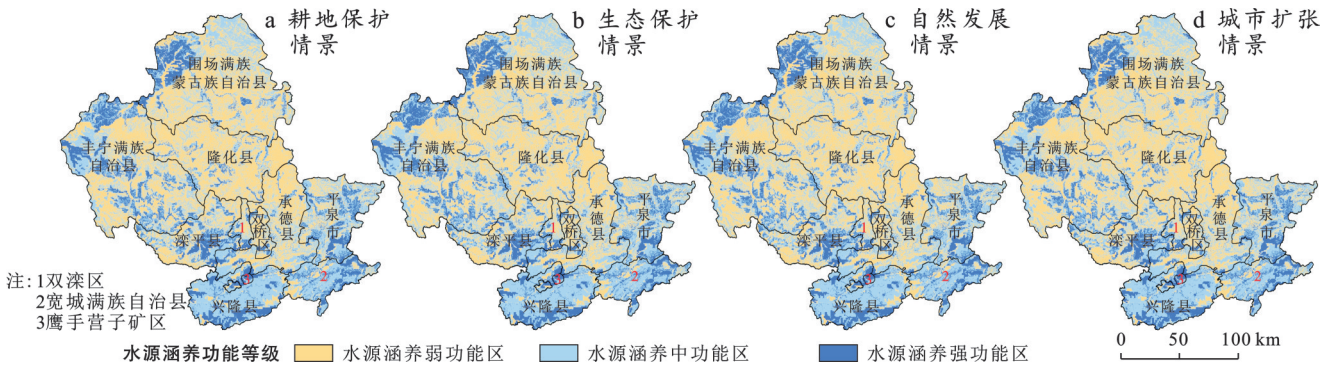


图 4 承德市 2028—2038 年不同情景水源涵养功能分区

Fig.4 Zoning of water conservation function under different scenarios in Chengde City from 2028 to 2038

4 讨论

4.1 土地利用变化趋势分析

本研究模拟结果揭示了不同发展情景下承德市土地利用结构的演变趋势及其潜在生态风险。模拟结果表明,2023—2038 年在不同情景中,该市各地类呈现显著差异。

生态保护情景下,植被恢复措施促使林、草地面积扩大,但部分增长以侵占生态区位较差的耕地为代价,反映出生态建设与粮食生产之间的权衡关系。耕地保护情景下,耕地面积大幅增加 11.95%,其中 91.2% 来源于草地,该扩张模式很可能超出区域生态承载力阈值,进而引发水土流失加剧与生物多样性下降等系统性生态风险^[26]。城市扩张情景下,不透水面面积显著增加 38.5%。其累积的生态退化、资源

耗竭及社会成本,从长远看可能超越短期经济收益,最终导致区域发展陷入不可逆的系统性危机^[27]。总体而言,森林面积在所有情景下均保持较强稳定性并呈现缓慢增长,凸显其作为区域生态安全屏障的基础作用。草地生态系统在无约束发展情景中退化比例高达 11.34%。作为关键的水土保持层,草地退化将直接导致地表径流增加,土壤侵蚀加剧,并为风蚀灾害创造条件,形成恶性生态循环。

承德市土地利用格局受自然与人文因素共同驱动,地形地质条件是决定土地利用空间分布的自然因素;而夜间灯光数据所反映的经济活动强度及村镇居民点分布是关键人文驱动因子,对建设用地与耕地扩张产生显著影响,与周亚鹏等^[28]研究一致。这表明未来土地空间规划需统筹考虑自然地理约束与社会经济发展需求。

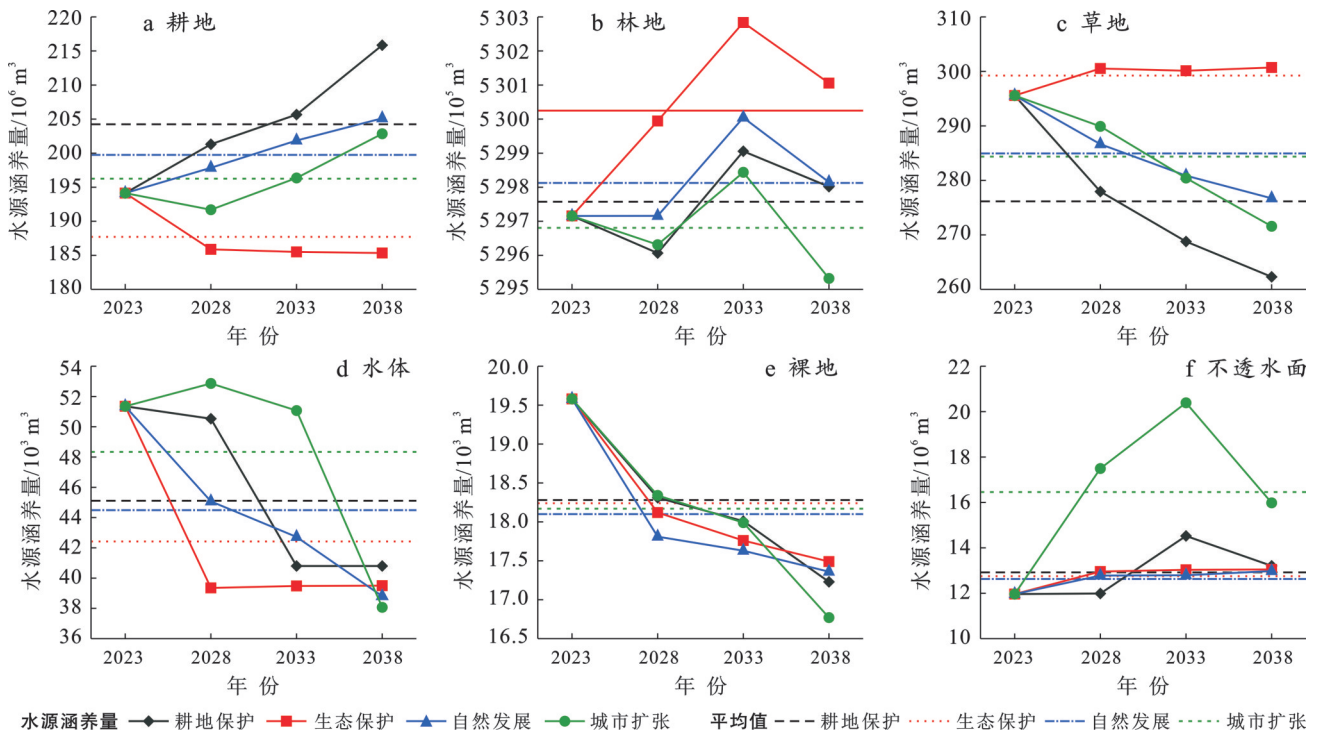


图 5 承德市各地类 2023—2038 年不同情景下水源涵养量

Fig.5 Water conservation amount of different land use types under different scenarios in Chengde City from 2023 to 2038

4.2 水源涵养功能变化趋势分析

本研究通过耦合 InVEST-PLUS 模型,揭示了承德市未来水源涵养功能的时空格局特征及其对未来土地利用变化的响应。研究表明,在不同发展情景下承德市水源涵养功能的空间分布均呈现高度稳定的格局。高值区稳定分布于围场县、丰宁县北部,以及平泉、宽城、兴隆等县的北部。这一发现与马靖宣等^[15]、王冶等^[2]的研究结论相符。该格局的形成主要原因是该区域优越的自然本底条件:作为京津冀地区重要的生态屏障,该区域拥有大面积的天然林和茂密草地,高植被覆盖度通过冠层截留,枯落物层持水和促进水分下渗等方式,极大地提升了生态系统的水源涵养功能;同时,该区域土壤质地疏松,孔隙度大,本身具备优良的持水和蓄水性能。相比之下,低水源涵养能力区稳定分布于承德市中部的城镇与工矿集聚区,如隆化县、承德县及承德市区。该区域大量的不透水面、工矿用地以及受人类干扰而退化的山地,严重破坏了土壤结构,导致土壤渗透性和持水能力显著下降,从而削弱了其水源涵养功能。这种格局的稳定性表明,区域水源涵养功能在宏观尺度上主要受地形、植被和土壤等自然地理要素的控制,短期内的发展模式变化尚不足以颠覆这一由自然本底决定的宏观格局^[29]。

尽管空间格局稳定,但水源涵养总量及各地类的贡献在不同情景下表现出显著差异性。耕地、林

地、草地与不透水面在水源涵养量上呈现出的“此消彼长”的权衡关系,本质上是承德市“三生”空间(生产、生活、生态空间)冲突的直接体现。在生态保护情景下,林、草地得到最大程度的保全与恢复,其水源涵养量达到峰值,而耕地则相应降至最低。这表明,严格保护森林和草地生态系统是最大化区域水源涵养服务的最有效途径。除生态保护情景外,草地的水源涵养量在其他情景中均持续下降,反映出草地在当前发展中面临着较大的转出压力,应成为未来生态监管的重点对象。林地的水源涵养功能在除城市扩张情景外的其他情景中均保持相对稳定,凸显了其作为区域水源功能“稳定器”的关键作用^[30]。然而,在城市扩张情景下,2033—2038 年林地水源涵养功能出现明显下降,这反映了城市蔓延对周边优质生态用地的侵占。特别需要指出的是,不透水面在城市扩张情景下显示的“水源涵养量”显著上升,这一结果实质上是其水文调节功能的退化。即地表径流的急剧增加与雨水下渗能力的丧失,这将直接加剧城市内涝风险^[31]。

为系统性提升承德市水源涵养功能与优化土地利用格局,本研究提出构建“质量提升—结构优化—边界管控”三位一体的土地治理体系。①质量提升。严守优质耕地红线,推行占补平衡与保护性耕作(如深松覆盖);对坡度 $>25^\circ$ 的区域实施“退耕还林还草”的刚性转化,以规避水土流失风险。②结构优化。

建立“森林固本,草地增效,耕地控险”的协同框架,通过国土空间规划的传导机制,平衡“三生”空间冲突。③边界管控。在水源涵养功能区、防风固沙带及生态保护区内划定草地开发禁令区,通过轮牧休养与退化修复,维持其“绿色水库”效能;设定城镇扩张增长阈值,通过存量用地再开发与立体绿化补偿机制,严格抑制城市建设对草地与耕地的侵蚀性占用。

本研究所构建的土地变化情景及相关结论基于特定的模型与情景假设,存在一定的局限性,未能充分耦合气候变化与植被群落结构动态演变等关键驱动因子。未来的研究需着力于耦合这些动态环境因子,构建一个更为综合的模型框架,以实现水源涵养功能更全面、更精准的动态模拟与预测,为筑牢京津冀生态安全屏障提供更坚实的科学支撑。

5 结论

(1)“三生”空间冲突仍是承德市未来土地利用变化的主要问题。在4种情景下,承德市森林面积最为稳定;除生态保护情景外,草地被大量侵占,呈逐渐退化趋势;在城市扩张情景下,不透水面面积大幅增加,承德市生态退化风险大大增加。地形因子坡度、坡向、DEM值、夜间灯光数据及村镇居民分布是土地利用变化的主要影响因素。

(2)承德市水源涵养功能空间分布格局虽保持稳定,然而其总量对未来土地利用变化响应敏感,在不同发展情景下差异显著。除生态保护情景外,草地水源涵养量持续下降,城市扩张对森林水源涵养的侵占,以及城市扩张背景下不透水面水源涵养量的异常增加是未来生态监管的重点。

(3)建议构建“质量—结构—边界”协同治理体系,严格保护森林与优质草地,控制耕地风险,遏制城镇无序扩张,通过国土空间优化提升复合生态系统服务功能,保障京津冀水安全与生态安全。

参考文献 (References)

- [1] 王云飞,叶爱中,乔飞,等.水源涵养内涵及估算方法综述[J].南水北调与水利科技,2021,19(6):1041-1071.
Wang Yunfei, Ye Aizhong, Qiao Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021,19(6):1041-1071.
- [2] 王治,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].生态与环境学报,2022,38(9):1138-1146.
Wang Ye, 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.

- [3] 高红凯,刘俊国,高光耀,等.水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析[J].地理学报,2023,78(1):139-148.
Gao Hongkai, Liu Junguo, Gao Guangyao, et al. Ecological and hydrological perspectives of the water retention concept [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 139-148.
- [4] 斛如媛,勾蒙蒙,刘常富,等.抚育方式对鄂中丘陵区马尾松人工林林下持水能力的影响[J/OL].林业科学研究,1-11. [2025-07-04]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1221.S.20250703.1443.001>.
Hu Ruyuan, Gou Mengmeng, Liu Changfu, et al. Effects of tending methods on the understory water-holding capacity of pinus massoniana plantations in the hilly region of central Hubei Province [J/OL]. Forest Research, 1-11. [2025-07-04]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1221.S.20250703.1443.001>.
- [5] 李琳,王帅,戚福坤,等.东部山地不同林型枯落物及土壤水文效应[J].森林工程,2025,41(6):1242-1250.
Li Lin, Wang Shuai, Qi Fukun, et al. Hydrological effects of litter and soil in different forest types in eastern mountainous areas [J]. Forest Engineering, 2025, 41(6):1242-1250.
- [6] 农海勤,陆明路,易弘韬,等.亚热带人工林凋落物和土壤层水源涵养功能[J].生态学报,2025,45(17):8599-8613.
Nong Haiqin, Lu Minglu, Yi Hongtao, et al. Water conservation function of litter and soil layer in subtropical plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): 8599-8613.
- [7] 韩朝辉,朱一龙,徐多勋,等.基于InVEST模型的汉江流域陕西段丰、枯水年水源涵养功能评价[J/OL].中国地质,2025:1-20. (2025-04-16). <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250415.1712.013>.
Han Zhaohui, Zhu Yilong, Xu Duoxun, et al. Evaluation of water conservation function in Shaanxi section of Hanjiang River basin in high and low water years based on InVEST model [J/OL]. Geology in China, 2025:1-20. (2025-04-16). <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20250415.1712.013>.
- [8] Yan Xin, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Spatio-temporal variations of water conservation and its influencing factors in the Qinghai Plateau, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111047.
- [9] 王辉源,宋进喜,吴琼.基于SWAT模型的秦岭北麓灞河流域水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究,

- 2023,30(6):307-315.
- Wang Huiyuan, Song Jinxi, Wu Qiong. Comprehensive evaluation of water source conservation function in the Bahe River basin at the northern foot of Qinling Mountains based on SWAT model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(6):307-315.
- [10] Azimi M, Barzali M, Abdolhosseini M, et al. Examining the impact of rangeland condition on water conservation by using an integrated modelling approach [J]. *Land Degradation & Development*, 2021,32(13):3711-3719.
- [11] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(8):3907-3925.
- [12] 彭守璋. 中国1 km 逐月潜在蒸散发数据集(1901—2024)[J/OL] [2025-02-02]. 国家青藏高原科学数据中心, <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>, 2025.
- Peng Shouzhong. 1 km monthly potential evapotranspiration dataset for China (1901—2024) [J/OL] [2025-02-02]. National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>, 2025.
- [13] 彭守璋. 中国1km分辨率逐月降水量数据集(1901—2024)[J/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>, 2025.
- Peng Shouzhong. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2024) [J/OL]. National Xizangan Plateau/Third Pole Environment Data Center, <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>, 2025.
- [14] 李怡颖, 马一奇, 陈庆松, 等. 基于InVEST模型的金沙江干热河谷区水源涵养功能时空演变特征及驱动因素分析[J/OL]. *环境科学*, 2025: 1-17. (2025-07-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202503189>.
- Li Yiyang, Ma Yiqi, Chen Qingsong, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of water conservation function in dry-hot valley of Jinsha River based on InVEST model [J/OL]. *Environmental Science*, 2025: 1-17. (2025-07-11). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjcx.202503189>.
- [15] 马靖宣, 金晓媚, 张绪财, 等. 基于InVEST模型的张承地区水源涵养功能时空变化特征[J]. *水文地质工程地质*, 2023,50(3):54-64.
- Ma Jingxuan, Jin Xiaomei, Zhang Xucai, et al. Spatio-temporal change characteristics of water conservation function in the Zhang-Cheng District based on the InVEST model [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023,50(3):54-64.
- [16] Liu Zhitao, Huang Sheng, Fang Chuanglin, et al. Global urban and rural settlement dataset from 2000 to 2020 [J]. *Scientific Data*, 2024,11:1359.
- [17] Chen Zuoqi, Yu Bailang, Yang Chengshu, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(3):889-906.
- [18] 李冰洁, 范志韬, 曲芷程, 等. 基于InVEST-PLUS模型的黄河流域内蒙古段生态系统碳储量评价及预测[J]. *干旱区研究*, 2024,41(7):1217-1227.
- Li Bingjie, Fan Zhitao, Qu Zhicheng, et al. Evaluation and prediction of ecosystem carbon storage in the Inner Mongolia section of the Yellow River basin based on the InVEST-PLUS model [J]. *Arid Zone Research*, 2024,41(7):1217-1227.
- [19] 李琛, 高彬斌, 吴映梅, 等. 基于PLUS模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. *浙江农林大学学报*, 2022,39(1):84-94.
- Li Chen, Gao Binpin, Wu Yingmei, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2022,39(1):84-94.
- [20] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. *干旱区地理*, 2022,45(4):1125-1136.
- Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. *Arid Land Geography*, 2022,45(4):1125-1136.
- [21] 王森, 刘顿, 单振东, 等. 承德市接坝地区土地利用变化及驱动因素分析[J]. *陕西林业科技*, 2024,52(1):31-39.
- Wang Miao, Liu Dun, Shan Zhendong, et al. Analysis of land use change and driving factors in transitional region from plateau to plain of Chengde [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2024,52(1):31-39.
- [22] 孙宗耀. 土地利用时空格局对城市热环境的影响研究: 以京津冀城市群为例[D]. 山东 济南: 山东师范大学, 2018.
- Sun Zongyao. Study on the influence of land use spatio-temporal pattern on urban thermal environment [D]. Jinan, Shandong: Shandong Normal University, 2018.
- [23] Mutale B, Qiang Fan. Modeling future land use and land cover under different scenarios using patch-generating land use simulation model. A case study of Ndola District [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024,12:1362666.
- [24] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于InVEST模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. *林业科学*, 2012,48(10):1-5.

- Yu Xinxiao, Zhou Bin, Lü Xizhi, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(10):1-5.
- [25] Shen Liqiang, Li Zexian, Hao Jiaxin, et al. Evaluating the dynamic response of cultivated land expansion and fallow urgency in arid regions using remote sensing and multi-source data fusion methods [J]. *Agriculture*, 2025, 15(8):27.
- [26] Wang Xiao, Che Lei, Zhou Liang, et al. Spatio-temporal dynamic simulation of land use and ecological risk in the Yangtze River delta urban agglomeration, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(5):829-847.
- [27] Chen Guo, Zuo Depeng, Xu Zongxue, et al. Changes in water conservation and possible causes in the Yellow River basin of China during the recent four decades [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 637:131314.
- [28] 周亚鹏, 刘欣, 刘琳, 等. 2000—2020 年京津冀地区国土空间多功能权衡强度时空演变及影响机制[J]. *生态学报*, 2024, 44(3):977-991.
- Zhou Yapeng, Liu Xin, Liu Lin, et al. Spatio-temporal dynamics and influencing factors of trade-off intensity among territorial space functions in the Beijing-Tianjin-Hebei region(2000—2020) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(3):977-991.
- [29] 张祯尧, 陈思瑾, 张振明, 等. 北京山区森林生态系统水源涵养功能沿海拔梯度的空间变异[J]. *生态学报*, 2025, 45(3):1239-1250.
- Zhang Zhenyao, Chen Sijin, Zhang Zhenming, et al. Spatial patterns of forest water conservation function along an elevation gradient in the Beijing mountain area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3):1239-1250.
- [30] Pei Xingfang, Yang Kun, Zhu Senlin, et al. Water conservation for plateau lakeside cities under the new development philosophy [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166:112560.
- [31] 王诗媛, 向洋, 魏唯一, 等. 黄河中游城市群水源涵养时空演变特征及影响机制分析[J]. *人民黄河*, 2025, 47(6):110-116.
- Wang Shiyuan, Xiang Yang, Wei Weiyi, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution characteristics and impact mechanism of water conservation in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2025, 47(6):110-116.

(上接第 305 页)

- [27] 王念胜, 杜碧辉, 彭维仕, 等. 基于改进雷达图法的侦察装备效能评估[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2021, 22(6):103-109.
- Wang Niansheng, Du Bihui, Peng Weishi, et al. An effectiveness evaluation method of reconnaissance equipment based on improved radar chart [J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(6):103-109.
- [28] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(11):2105-2138.
- Li Zhongka, Li Xiaoyan, Zhou Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022, 52(11):2105-2138.
- [29] Torra V. Hesitant fuzzy sets [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6):529-539.
- [30] 周金明, 苏为华, 王玉颖. Radar 图综合评价方法的缺陷分析及其改进思路[J]. *统计与信息论坛*, 2017, 32(7):44-48.
- Zhou Jinming, Su Weihua, Wang Yuying. The defects of radar chart method and its improvement [J]. *Statistics & Information Forum*, 2017, 32(7):44-48.
- [31] 彭定洪, 李杰. 智慧旅游安全评价的犹豫模糊全排列多边形图示法[J]. *生态经济*, 2022, 38(9):137-144.
- Peng Dinghong, Li Jie. Hesitant fuzzy full permutation polygon synthetic indicator method for safety evaluation of smart tourism [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(9):137-144.
- [32] 汤铃, 李建平, 余乐安, 等. 基于距离协调度模型的系统协调发展定量评价方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(4):594-602.
- Tang Ling, Li Jianping, Yu Lean, et al. Quantitative evaluation methodology for system coordination development based on distance coordination degree model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(4):594-602.