

基于SWAT与Ca-Markov的地下水补给量对 土地利用变化的响应研究

——以唐河流域下游为例

陈纪湘¹, 赵 从²

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年4月1日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月29日

摘 要

土地利用变化深刻影响地下水补给时空格局, 尤其在人类活动剧烈且水资源供需矛盾突出的地区表现更为复杂。开展土地利用变化对地下水补给量的影响研究, 有利于揭示地下水补给对土地利用变化的响应规律, 为区域地下水资源可持续利用与国土空间优化提供科学依据。本文以唐河流域下游为研究区, 基于DEM、土地利用、土壤、气象水文等多源数据构建SWAT (Soil and Water Assessment Tool)模型; 系统分析1985~2025年五期土地利用变化特征; 设置三种极端土地利用情景, 并构建Ca-Markov模型, 设置两种2035年未来土地利用情景, 模拟地下水补给量变化。结果表明: 2025年土地利用下多年平均地下水补给量为2054.84万m³, 相比1985年土地利用下降了668.36万m³; 土地利用类型对地下水补给量的影响排序依次为草地 > 林地 > 耕地; 未来规划约束情景下2035年补给量为1976.58万m³, 显著高于自然延续情景的1637.11万m³。通过优化用地结构有效提升地下水补给能力, 为流域水资源可持续管理提供依据。

关键词

地下水补给量, SWAT模型, 土地利用变化, Ca-Markov模型, 唐河流域下游

Study on the Response of Groundwater Recharge to Land Use Change Based on SWAT and Ca-Markov Models

—A Case Study of the Lower Reaches of Tanghe River Basin

Jixiang Chen¹, Cong Zhao²

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

文章引用: 陈纪湘, 赵从. 基于 SWAT 与 Ca-Markov 的地下水补给量对土地利用变化的响应研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(5): 836-850. DOI: 10.12677/ag.2026.165076

Abstract

Land use change has a profound impact on the temporal and spatial pattern of groundwater recharge, especially in areas where human activities are intense and the contradiction between supply and demand of water resources is prominent. The research on the impact of land use change on groundwater recharge will help reveal the response law of groundwater recharge to land use change, and provide a scientific basis for the sustainable use of regional groundwater resources and land space optimization. Taking the lower reaches of the Tanghe River Basin as the research area, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is constructed based on multi-source data such as DEM, land use, soil, meteorology and hydrology; The characteristics of land use change in five periods from 1985 to 2025 were systematically analyzed; Three extreme land use scenarios are set up, and the CA Markov model is constructed. Two future land use scenarios in 2035 are set up to simulate the change in groundwater recharge. The results show that the average annual groundwater recharge under land use in 2025 is 20.5484 million m³, which is 6.6836 million m³ lower than that in 1985; The influence of land use types on groundwater recharge ranked as grassland > woodland > farmland; The supply volume in 2035 under the future planning constraint scenario is 19.7658 million m³, which is significantly higher than 16.3711 million m³ under the natural continuation scenario. By optimizing the land use structure, the groundwater recharge capacity can be effectively improved, which provides a basis for the sustainable management of water resources in the basin.

Keywords

Groundwater Recharge, SWAT Model, Land Use Change, Ca-Markov Model, Lower Reaches of Tanghe River Basin

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水是水资源的重要组成部分, 在保障人类生存和维持生态系统方面发挥着至关重要的作用[1]。近年来, 随着人口快速增长与城市化进程持续加快, 全球约 30% 的区域含水层地下水位加速下降, 地下水系统面临枯竭风险[2] [3]。土地利用作为人类活动干预地表生态系统的重要方式, 通过改变下垫面入渗性能和植被覆盖度, 进而改变入渗补给过程[4]。

国内外学者在地下水补给量计算方法方面开展了大量研究。水均衡法调查时间步长内各项补给项、排泄项和实际地下水储存变化量, 通过水均衡方程验证可靠性, 即可用相关项相减得到地下水补给量, 是目前最通用的地下水补给量间接计算方法[5]。随着计算机技术的发展, 数值模拟方法逐渐成为主流, SWAT 模型作为分布式水文模型, 能够集成 GIS、遥感和 DEM 数据, 适用于大中型流域的长时段水文过程模拟[6]。

土地利用变化对地下水的影响是当前研究热点。Andualem 等通过加权叠加土地覆盖、排水密度等专题层, 开发了地下水潜力远景区识别方法[7]; 胡鑫等发现呼图壁县地下水埋深与耕地面积变化高度相关, 控制耕地扩张可使局部地下水位恢复[8]; 陆蕴青等定量评估了黄土高原地区农地转化为苹果园对地表蒸散的影响, 结果表明农地转化为苹果园后地表蒸散量增加[9]。

唐河属于海河水系大清河上源支流, 下游流经保定境内, 是华北平原典型缺水地区。2019年起, 南水北调中线工程开始为唐河进行生态补水, 显著提升了受水区的地下水位, 遏制了地下水环境的持续恶化 [10], 但土地利用格局对地下水补给的定量影响与未来调控路径仍不明确。本文以唐河流域下游为研究区, 基于 1985~2025 年五期土地利用数据及 DEM、土壤、气象、水文等多源数据构建 SWAT 模型, 分析土地利用时空演变特征; 结合 Ca-Markov 模型与地方国土空间规划, 设置自然延续与规划约束两种 2035 年未来土地利用情景, 模拟不同情景下地下水补给量的时空变化。研究成果可为唐河流域地下水管理与土地利用政策制定提供科学依据, 也为类似区域的地下水补给量对土地利用变化响应研究提供方法借鉴。

2. 研究区概况

2.1. 区域概况

唐河发源于浑源县南部的翠屏山, 经灵丘县、涞源县、唐县、定州市、清苑区, 最终于安新县境内汇入白洋淀, 流域面积约为 5112.21 km²。流域高程跨度较大, 整体地势呈西北高、东南低的走向。流域地势西北高、东南低, 属于温带大陆性季风气候, 多年平均气温约 11.2℃, 多年平均降水量约 439.6 mm, 汛期(6~9 月)降水量占全年的 60%~90%。选取唐河下游平原区为研究区, 西起西大洋水库, 东至保定市清苑区北辛店村, 面积约 920.12 km², 研究区范围内唐河长度约 104.26 km。研究区地理位置如图 1 所示。

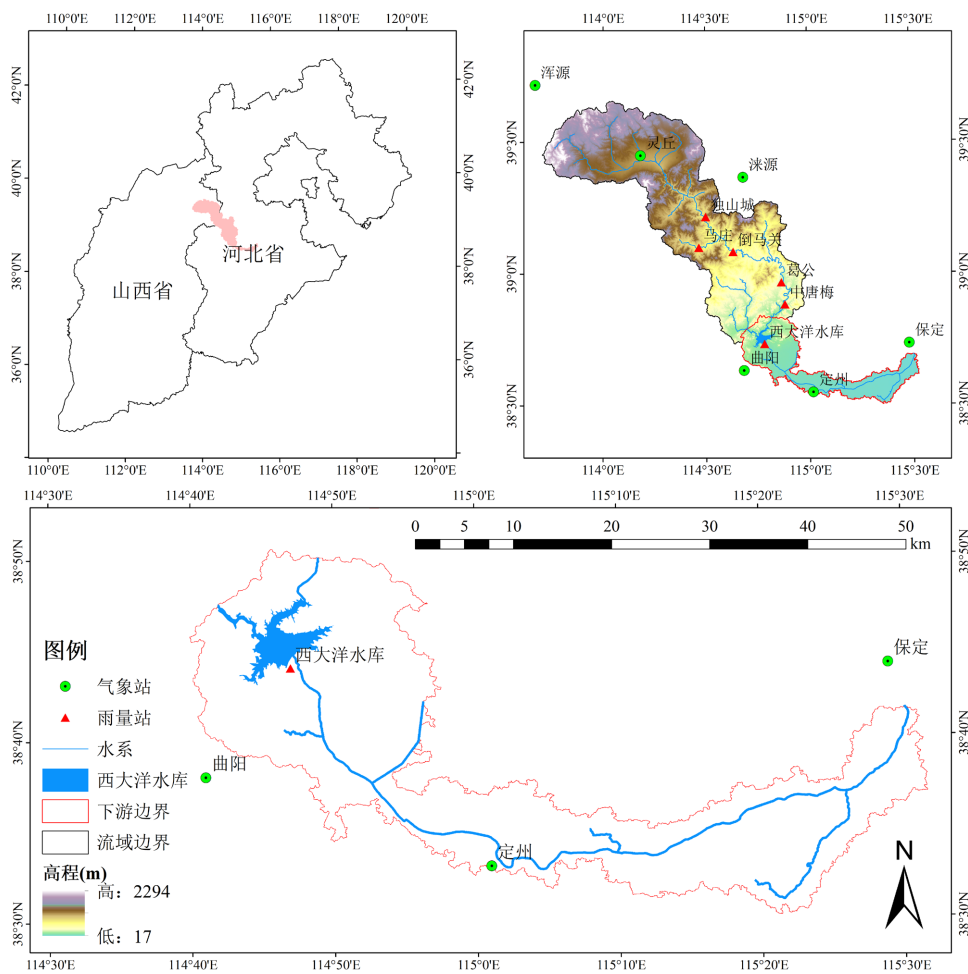


Figure 1. Geographical location map of the study area
图 1. 研究区地理位置图

2.2. 数据来源

SWAT 模型构建的核心数据来源如表 1 所示。其中, DEM 采用 ASTER GDEM V3 30 m 数据, 对其进行填洼处理; 土地利用数据采用武汉大学杨杰和黄昕教授团队在 Google Earth Engine 平台开发的“CLCD 土地利用数据”, 选择 1985 年、1995 年、2005 年、2015 年、2025 年五期土地利用数据, 并将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地; 气象数据来源于浑源、灵丘、涞源、曲阳、定州、保定 6 个气象站点, 雨量数据来源于独山城、马庄、倒马关、葛公、中唐梅、西大洋水库 6 个雨量站点, 水文数据来源于西大洋水库站, 时间跨度均为 1998~2023 年。

Table 1. Data sources for the SWAT model

表 1. SWAT 模型数据来源

数据类型	数据描述	数据来源
DEM 数据	30 m × 30 m	地理空间数据云
土地利用数据	30 m × 30 m	Google Earth Engine 平台
土壤数据	1000 m × 1000 m	世界土壤数据库(HWSD)
气象数据	日降水量、日最高气温、 日最低气温、日平均风速、日平均相对湿度	中国气象数据网
雨量、径流、水库数据	日降水量、月平均径流量、月出库流量	海河流域水文年鉴

3. 研究方法

3.1. SWAT 模型

SWAT 模型是一种基于物理过程的分布式水文模型, 水文循环基于水量平衡方程, 其公式如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中: SW_t 为土壤最终含水量; SW_0 为第 i 天的土壤初始含水量; R_{day} 为第 i 天的降水量; Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量; E_a 为第 i 天的蒸散发量; W_{seep} 为第 i 天离开土壤剖面底部的渗透与旁通水流量; Q_{gw} 为第 i 天回归流量。所有指标的单位均为毫米(mm)。

地下水补给量即土壤底层的水分经降水入渗或旁通穿过包气带后, 向含水层补给的水量。针对水分从土壤剖面流出到含水层补给过程中的时间延迟, SWAT 模型中地下水补给量计算公式如下:

$$W_{rchrg,i} = [1 - \exp(-1/\delta_{gw})] \cdot W_{seep} + \exp(-1/\delta_{gw}) \cdot W_{rchrg,i-1} \quad (2)$$

式中: $W_{rchrg,i}$ 为第 i 天的含水层地下水补给量; $W_{rchrg,i-1}$ 为第 $i-1$ 天的含水层地下水补给量; δ_{gw} 为地下水延迟排泄时间, 通常以日为单位; W_{seep} 为第 i 天离开土壤剖面底部的渗透与旁通水流量。所有指标的单位均为毫米(mm)。

选取纳什效率系数(E_{ns})和决定系数(R^2)两个评价指标, 若 E_{ns} 和 R^2 均大于 0.5, 则认为满足模型精度要求, 模型在该研究区域是可行的。 E_{ns} 和 R^2 越接近于 1, 则说明模型的可信度越高, 拟合效果越好。两个指标的具体计算公式如下:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (4)$$

式中： Q_s 为径流量模拟值， \bar{Q}_s 为平均径流量模拟值， Q_o 为径流量实测值， \bar{Q}_o 为平均径流量实测值，以上四项单位通常为立方米/秒(m^3/s)。 n 为样本总数。

3.2. 土地利用动态度

单一土地利用动态度主要衡量某一土地利用类型在一定时间间隔内的数量变化程度与速度，是土地利用动态变化分析中最基础、最常用的指标之一，可直观比较不同土地利用类型在同一区域同一时间内变化的快慢。其公式如下：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中： U_a 为土地利用类型研究起始年份； U_b 为土地利用类型研究结束年份； T 为研究时段的长度(年)； K 为单一土地利用动态度的值(%/年)，正值表示面积增加，负值表示面积减少。

综合土地利用动态度衡量区域内所有土地利用类型整体活跃程度，对比同一区域不同时期总体土地利用变化的剧烈程度，能从宏观层面反映某一时期土地利用结构的总变化趋势。其公式如下：

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_i}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中： ΔU_i 为研究期内第*i*类土地利用类型的面积变化量(km^2)，用绝对值表示； U_i 为研究初期第*i*类土地利用类型的面积(km^2)； n 为土地利用类型的总数； T 为研究时段的长度(年)； L 为综合土地利用动态度的值(%/年)。

3.3. 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵通过矩阵形式，精准呈现研究初期到研究末期各土地利用类型的转换方向和数量变化。其公式如下：

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： S_{ij} 为土地利用类型从*i*类转移到*j*类的面积(km^2)； n 为土地利用类型的总数。

3.4. Ca-Markov 模型

Ca-Markov 模型融合了马尔可夫链(Markov Chain)和元胞自动机(Cellular Automata, CA)，能够同时预测土地利用的数量变化与空间分布，因此广泛应用于土地利用变化的未来情景模拟。

马尔可夫链基于转移概率矩阵预测未来各土地类型面积，其公式如下：

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$S_{t+k} = S_t \times P_{ij}^k \quad (9)$$

式中: P_{ij} 为土地利用类型从 i 类转移到 j 类的概率, 每行概率之和为 1; n 为土地利用类型的总数; k 为时间步长(年); t 为研究起始年份; S_t 为研究起始年份土地利用类型的面积(km²); S_{t+k} 为初始时刻过去 k 时间步长后土地利用类型的面积(km²)。

元胞自动机通过空间转化规则模拟土地利用类型的空间演变。其公式如下:

$$C_{t+k} = f(C_t, N) \quad (10)$$

式中: C_t 为初始时刻的元胞状态; C_{t+k} 为初始时刻过去 k 时间步长后的元胞状态; N 为元胞初始时刻的领域范围; f 为转化规则函数。

采用 $Kappa$ 系数对预测土地利用与真实土地利用比较相似性, 进行精度验证。其公式如下:

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (11)$$

式中: P_o 为栅格总体分类精度, 即模拟正确的栅格比例; P_e 为随机情况下栅格预期的偶然一致性比例。 $Kappa$ 系数通常介于 0~1 之间, 其值越接近 1, 代表精度验证结果越可靠。当 $Kappa > 0.8$ 时, 代表精度验证结果高度可靠。

4. 结果与分析

4.1. SWAT 模型率定与验证

本研究首先对 DEM 进行填洼预处理, 防止河网出现断流现象, 以确认河流流向、子流域出口的位置以及子流域和水文响应单元的划分。然后将土地利用数据重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地与未利用地 6 类。接着对土壤数据进行重分类和属性计算。对于气象数据, 按照日降水量、日最高最低气温、日平均风速、日平均相对湿度进行分类整理, 构建 SWAT 模型索引表。将全流域划分为 53 个子流域, 选取 43~53 号子流域为下游研究区。结合土地利用、土壤与坡度分级, 将研究区划分为 869 个水文响应单元。选取 23 个参数, 利用 SWAT-CUP 软件进行参数率定验证, 以 1998~1999 年为预热期, 2000~2014 年为率定期, 2015~2023 年为验证期, 各参数的定义、初始值范围和最终率定值如表 2 所示, 西大洋水库站逐月径流量模拟实测曲线如图 2 所示。结果表明, 率定期与验证期均达 0.75 以上, 满足模型精度要求, 表明 SWAT 模型在唐河流域具有良好的适用性。

Table 2. Parameter calibration results of Xidayang Reservoir station

表 2. 西大洋水库站参数率定结果

参数名称	参数定义	参数初始范围	参数最佳值
V_SFTMP.bsn	降雪温度	[-5, 0]	-0.98
V_SMTMP.bsn	融雪温度	[0, 10]	8.39
V_SMFMX.bsn	最大融雪速率(夏至日)	[5, 20]	7.93
V_SMFMN.bsn	最小融雪速率(冬至日)	[0, 5]	0.82
V_TIMP.bsn	积雪温度滞后系数	[0, 1]	0.23
V_SURLAG.bsn	地表径流滞后时间	[0.05, 24]	9.75
V_TLAPS.sub	温度垂直递减率	[-10, 10]	6.62
V_CANMX.hru	冠层最大蓄水量	[0, 100]	79.3
V_ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	[0, 1]	0.31

续表

V_EPCO.hru	植物吸收补偿系数	[0, 1]	0.44
R_CN2.mgt	SCS 径流曲线编号	[-0.2, 0.2]	-0.13
R_SOL_BD().sol	土壤湿密度	[-0.5, 0.5]	-0.13
R_SOL_AWC().sol	土壤有效含水量	[-0.5, 0.5]	0.19
R_SOL_K().sol	土壤饱和水力传导系数	[-0.8, 0.8]	-0.75
R_SOL_ALB().sol	土壤地表反照率	[-0.5, 0.5]	-0.43
V_GW_DELAY.gw	地下水滞后时间	[0, 500]	132.5
V_ALPHA_BF.gw	基流 α 系数	[0, 1]	0.51
V_GWQGN.gw	浅层地下水产生基流阈值	[0, 5000]	1755
V_GW_REVAP.gw	地下水再蒸发系数	[0.02, 0.2]	0.03
V_REVAPMN.gw	浅层地下水再蒸发阈值	[0, 500]	33.5
V_RCHRG_DP.gw	深层含水层渗透率	[0, 1]	0.61
V_CH_N2.rte	主河道曼宁系数	[0, 0.3]	0.16
V_CH_K2.rte	主河道冲积层有效导水率	[5, 130]	56.63

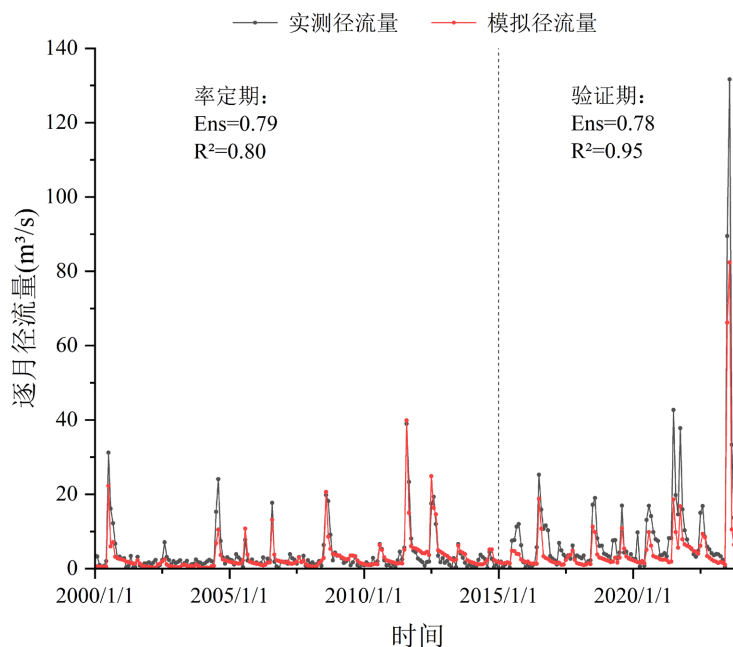


Figure 2. Simulated and measured monthly runoff curve at Xidayang Reservoir station

图 2. 西大洋水库站逐月径流量模拟实测曲线

4.2. 土地利用类型分析

唐河流域下游土地利用动态度及空间分布图如表 3 和图 3 所示。唐河流域下游面积最大的土地类型为耕地, 最高占比为 74.85%, 但 40 年以来, 耕地面积总体呈减少态势, 与 2005 年前相比, 2005~2025 年后耕地的缩减速率显著加快, 至 2025 年最低占比为 62.67%。林地面积总体处于缓慢增加的状态。草地面积在唐河流域总体处于缓慢减少的状态, 波动较小, 但 2015~2025 年下降速率较快。林地和草地主

要分布于唐河流域下游西大洋水库西北部。水域面积除在 1995~2005 年减少以外, 其余时间段均增加, 增长速率最快的时间段为 2015~2025 年, 水域主体为西大洋水库。建设用地整体呈现增长的趋势, 在所有土地利用类型中增长速率最快, 并且各时间段无负值, 其中增长速率最快的时间段是 1985~1995 年。未利用地面积总体呈减少态势, 是平均单一土地利用动态度绝对值最高的地类, 除 1985~1995 年缓慢减少以外, 其余时间段均快速减少。

Table 3. Dynamic degree of land use in the lower reaches of Tanghe River Basin from 1985 to 2025 (%)

表 3. 唐河流域下游 1985~2025 年土地利用动态度(%)

年份	单一土地利用动态度						综合土地利用动态度
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
1985~1995	-0.33	1.58	-1.31	1.10	3.54	0.64	0.39
1995~2005	-0.39	1.96	0.11	-4.41	3.29	-7.42	0.46
2005~2015	-0.42	1.89	-1.17	2.74	1.92	-7.25	0.41
2015~2025	-0.59	0.69	-1.10	7.40	1.48	-6.53	0.49
1985~2005	-0.36	1.92	-0.60	-1.90	3.99	-3.63	0.41
2005~2025	-0.49	1.36	-1.07	6.08	1.84	-4.52	0.45
1985~2025	-0.41	1.90	-0.77	0.94	3.65	-2.43	0.40

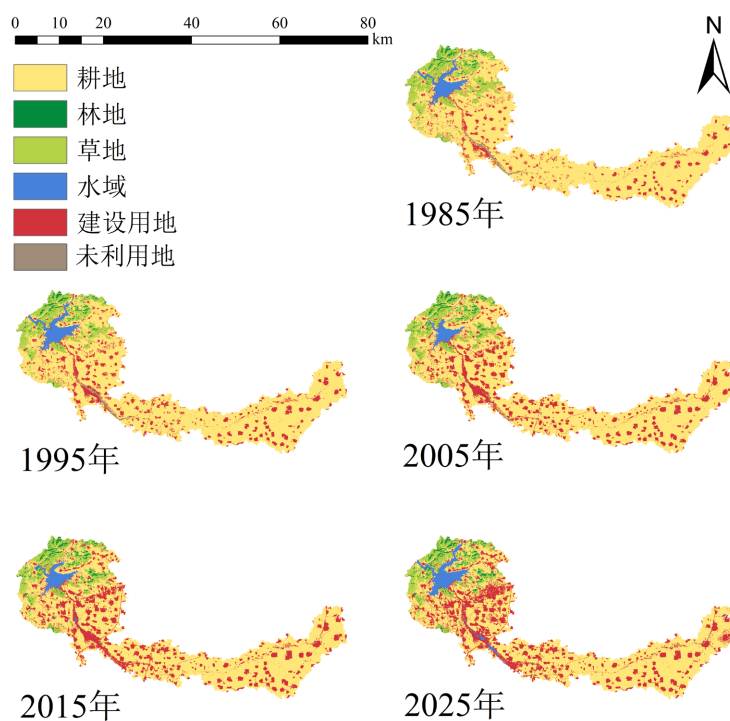


Figure 3. Spatial distribution of land use types in the lower reaches of the Tanghe River Basin from 1985 to 2025

图 3. 唐河流域下游 1985~2025 年土地利用类型空间分布图

唐河流域下游 1985~2025 年每 10 年的土地利用转移矩阵如表 4~7 所示。1985~1995 年为耕地缩减的起始阶段, 耕地向建设用地转出 31.75 km², 同时草地向耕地、林地的转移较为显著; 1995~2005 年耕地向建设用地转出规模增至 35.00 km², 同时水域向耕地转出 12.16 km², 成为该时段耕地面积补给的核心来

源; 2005~2015 年耕地向建设用地持续转出 28.33 km², 建设用地转入来源高度集中于耕地, 草地向林地、耕地的转移规模有所扩大; 2015~2025 年耕地向建设用地、水域转出规模分别达 32.61 km²、10.60 km², 建设用地扩张趋势延续, 同时耕地向林草地的生态转换有所提升。整体而言, 研究期内区域土地利用转换的主导特征为耕地持续向建设用地转出, 地类转换的规模与方向清晰反映了城市化进程与国土空间管控政策的阶段性影响。

Table 4. Land use transfer matrix in the lower reaches of Tanghe River Basin from 1985 to 1995 (km²)

表 4. 唐河流域下游 1985~1995 年土地利用转移矩阵(km²)

1985 年	1995 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	654.09	0.11	0.86	1.91	31.75	0.00
林地	0.23	11.24	0.01	0.00	0.00	0.00
草地	11.13	1.93	86.80	0.06	0.41	0.55
水域	0.09	0.00	0.00	26.93	0.02	0.00
建设用地	0.01	0.00	0.00	1.13	86.76	0.00
未利用地	0.23	0.00	0.03	0.00	0.02	3.84

Table 5. Land use transfer matrix in the lower reaches of Tanghe River Basin from 1995 to 2005 (km²)

表 5. 唐河流域下游 1995~2005 年土地利用转移矩阵(km²)

1995 年	2005 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	623.66	0.32	6.66	0.11	35.00	0.01
林地	0.15	13.12	0.01	0.00	0.00	0.00
草地	2.92	2.42	81.43	0.01	0.77	0.14
水域	12.16	0.01	0.01	16.63	1.21	0.00
建设用地	0.02	0.00	0.00	0.03	118.91	0.00
未利用地	0.66	0.00	0.60	0.00	2.16	0.97

Table 6. Land use transfer matrix in the lower reaches of Tanghe River Basin from 2005 to 2015 (km²)

表 6. 唐河流域下游 2005~2015 年土地利用转移矩阵(km²)

2005 年	2015 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	604.96	0.71	1.24	4.31	28.33	0.00
林地	0.32	15.46	0.07	0.00	0.03	0.00
草地	7.05	2.71	76.96	0.02	1.73	0.23
水域	0.35	0.00	0.00	16.31	0.12	0.00
建设用地	0.01	0.00	0.00	0.72	157.33	0.00
未利用地	0.18	0.00	0.04	0.01	0.82	0.08

Table 7. Land use transfer matrix in the lower reaches of Tanghe River Basin from 2015 to 2025 (km²)
表 7. 唐河流域下游 2015~2025 年土地利用转移矩阵(km²)

2015 年	2025 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	565.75	0.94	2.97	10.60	32.61	0.00
林地	1.78	16.87	0.17	0.00	0.06	0.00
草地	8.81	2.37	66.43	0.03	0.64	0.03
水域	0.22	0.01	0.00	21.00	0.16	0.00
建设用地	0.01	0.00	0.00	5.55	182.80	0.00
未利用地	0.05	0.00	0.11	0.03	0.03	0.08

4.3. 土地利用情景构建

本研究构建了 3 个极端土地利用情景, 以 1985 年土地利用为基准, 将极端土地利用情景设为 3 种, 并分别命名为 S1 (将林地、草地转变为耕地)、S2 (将耕地、草地转变为林地)、S3 (将耕地、林地转变为草地), 以定量分析单一土地利用类型耕地、林地、草地对地下水补给量的影响程度。

本研究构建了 2 个土地利用情景, 以 2025 年土地利用为基准, 将自然延续情景命名为 S4, 该情景仅基于历史趋势预测, 不设置任何影响因子约束; 将规划约束情景命名为 S5, 该情景依据《保定市国土空间总体规划(2021—2035 年)》[11] (下称国土空间规划) 构建, 严格守护“三区三线”, 通过为耕地、林地、草地、水域与建设用地 5 种土地类型设置限制性因素和影响性因素构建适宜性图集, 实现政策导向下的土地利用空间分配。未利用地面积积极小, 采用默认适宜性图集。

耕地适宜性图集依据《国土空间规划》中尽量不占或少占耕地、确保耕地进出平衡、严格保护保定市东部平原永久基本农田等目标设定。林地适宜性图集依据《国土空间规划》中严格林地用途管制、适度新增林地规模、引导苗木与林木等种植业向山区转移、保护并修复沿唐河林地等目标设定, 将 2025 年的林地设为禁止转换区域, 三个影响因子的权重采用 IDRISI 17.0 软件内置的层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 确定, 构造判断矩阵如表 8 所示。经软件自动计算, 求得一致性比率 (Consistency Ratio, CR) 为 $0.05 < 0.1$, 通过一致性检验, 权重结果可信。草地适宜性图集依据《国土空间规划》中优化调整草地规模、引导草坪等种植业向山区转移等目标设定。水域适宜性图集依据《国土空间规划》中重点保护水域、陆地水域面积保持稳定等目标设定。建设用地适宜性图集依据《国土空间规划》中严格控制建设用地总量、优先保障民生、基础设施和重点项目建设用地需求等目标设定。各地类筛选影响因子及权重如表 9 所示, 每个地类的各影响因子权重总和为 1。

Table 8. Judgment matrix of influencing factors of woodland under S5 scenario in the lower reaches of Tanghe River Basin
表 8. 唐河流域下游 S5 情景下林地影响因素判断矩阵

	高程	坡度	距河流的距离
高程	1	1/2	1
坡度	2	1	1
距河流的距离	1	1	1

Table 9. Impact factors and weights of land use type area prediction in 2035 under S5 scenario in the lower reaches of the Tanghe River Basin

表 9. 唐河流域下游 S5 情景下 2035 年土地利用类型面积预测影响因子及权重

土地利用类型	限制性因素	影响因子	趋势	适宜性数值范围	权重
耕地	1985~2025 年耕地交集禁止转出	高程	负	50~1100	0.3000
		坡度	负	5~15	0.7000
林地	2025 年林地禁止转出	高程	先正后负	70~800, 1500~2200	0.2599
		坡度	先正后负	15~25, 45~60	0.4126
		距河流的距离	负	0~7000	0.3275
草地	/	高程	先正后负	0~150, 800~2200	0.4000
		坡度	负	15~25	0.6000
水域	2025 年水域禁止转出	高程	先正后负	130~133, 133~150	0.7000
		坡度	负	0~0.1	0.2000
		距水域的距离	负	0~200	0.1000
建设用地	2025 年建设用地禁止转出	距建设用地的距离	负	0~30	1.0000

在进行未来土地利用预测之前,对预测模型进行检验,以 2005 年和 2015 年土地利用为基准预测 2025 年的土地利用,并与真实的 2025 年土地利用进行比较。求得 S4 情景下的 *Kappa* 值为 0.9615, S5 情景下的 *Kappa* 值为 0.9305,均符合模拟要求。以 2025 年为基准年份预测得到 2035 年土地利用的图像,如图 4 所示,对应的土地利用转移矩阵如表 10 和表 11 所示。S4 情景下,耕地面积严重萎缩,减少 81.24 km²,林地面积减少 2.93 km²;草地面积减少 6.43 km²;水域面积增加 59.87 km²;建设用地延续了 2015 年至 2025 年迅速增长的趋势,增加 30.79 km²。S5 情景下,唐河流域下游只有极少数土地利用类型发生变化。其中,建设用地面积保持不变,耕地面积增加了 2.19 km²;林地面积增加了 0.06 km²;草地面积减少了 8.83 km²;水域面积增加了 6.61 km²,建设用地扩张得到有效管控,生态系统有所改善,保障了耕地面积,土地利用结构趋于稳定。

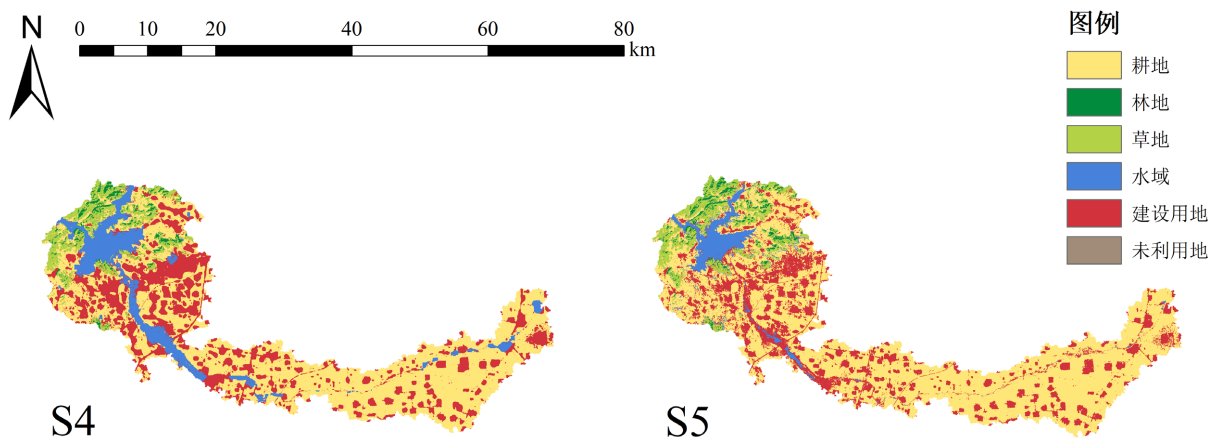


Figure 4. Spatial distribution of land use types in the lower reaches of the Tanghe River Basin under different scenarios in the future

图 4. 未来不同情景下唐河流域下游土地利用类型空间分布图

Table 10. Land use transfer matrix for 2025~2035 under S4 scenario in the lower reaches of Tanghe River Basin (km²)
表 10. 唐河流域下游 S4 情景下 2025~2035 年土地利用转移矩阵(km²)

2025 年	2035 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	486.07	0.00	0.20	20.99	69.36	0.00
林地	3.51	16.45	0.07	0.00	0.15	0.00
草地	5.79	0.81	62.97	0.00	0.12	0.00
水域	0.00	0.00	0.00	37.21	0.00	0.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	38.86	177.45	0.00
未利用地	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.06

Table 11. Land use transfer matrix for 2025~2035 under S5 scenario in the lower reaches of Tanghe River Basin (km²)
表 11. 唐河流域下游 S5 情景下 2025~2035 年土地利用转移矩阵(km²)

2025 年	2035 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	569.76	0.00	1.56	5.30	0.00	0.00
林地	0.00	20.19	0.00	0.00	0.00	0.00
草地	9.04	0.06	59.29	1.28	0.00	0.00
水域	0.00	0.00	0.00	37.21	0.00	0.00
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	216.31	0.00
未利用地	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.07

4.4. 地下水补给量变化

不同土地利用情景下多年平均地下水补给量如表 12 所示, 计算的地下水补给量为 Output 文件中 GW_RCHG (进入含水层的地下水补给量)与 HRU 面积的乘积。1985~2025 年, 研究区地下水补给量总体呈下降趋势, 2025 年补给量为 2054.84 万 m³, 较 1985 年减少 668.36 万 m³, 减幅 24.54%。极端情景模拟表明, 土地利用类型对地下水补给的促进效应排序为草地 > 林地 > 耕地。未来情景下, S4 情景补给量将进一步锐减至 1637.11 万 m³, 而 S5 情景仅降至 1976.58 万 m³, 两者相差 339.47 万 m³。

Table 12. Different land use types and annual average groundwater recharge in the lower reaches of Tanghe River Basin
表 12. 唐河流域下游不同土地利用类型与多年平均地下水补给量

土地利用类型	多年平均地下水补给量(万 m ³)
1985 年	2723.20
1995 年	2507.36
2005 年	2837.45
2015 年	2437.20
2025 年	2054.84

续表

耕地 S1	2649.77
林地 S2	2779.93
草地 S3	3318.02
自然延续 S4	1637.11
规划约束 S5	1976.58

唐河流域下游不同土地利用类型下各子流域多年平均地下水补给量分布如图 5 所示。总体来看, 唐河流域下游地下水补给量空间分布并不均匀。1985~2025 年, 地下水补给量较高的为西大洋水库西北的 43、44 号子流域, 林地和草地集中于此; 其次为东南的 51~53 号子流域, 以耕地和建设用地为主, 建设用地占比相对较低; 较低的 47~49 号子流域, 同为耕地和建设用地, 且建设用地比重相比 51~53 号子流域较高。随着耕地缩减和建设用地扩张, 各子流域地下水补给量总体下降, 但 2005 年 43、44 号子流域补给量为五期最高。S1 情景下, 49~53 号子流域因土地利用变化极小, 地下水补给量变化可忽略, 43、44 号子流域地下水补给量减少; S2 情景下, 除 43、44 号子流域减少外, 其余子流域地下水补给量均增加; S3 情景下, 各子流域地下水补给量均增加; S4 情景下, 西北各子流域地下水补给量较 2025 年显著下降, 东南变化较小; S5 情景下各子流域地下水补给量较 2025 年略有下降, 其中 43 号子流域变化最大。

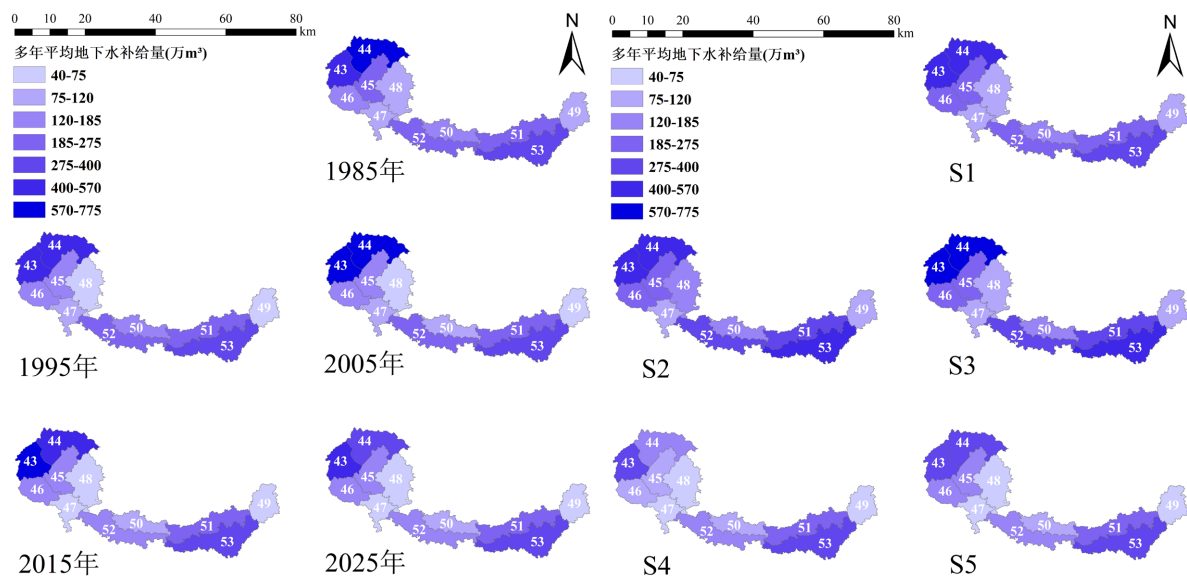


Figure 5. Distribution of annual average groundwater recharge under different land use types in the lower reaches of Tanghe River Basin

图 5. 唐河流域下游不同土地利用类型下各子流域多年平均地下水补给量分布

5. 讨论

5.1. 地下水补给量变化归因分析

1985 至 2025 年土地利用下研究区多年平均地下水补给量总体呈下降趋势, 其直接原因是建设用地作为不透水面持续扩张, 40 年间研究区建设用地面积增幅高达 146.11%, 硬化不透水面直接阻断了降水与土壤包气带的水力联系, 使绝大多数原本可入渗补给地下水的降水转化为地表径流快速流失; 同时,

耕地和草地面积的减少进一步削弱了降水入渗能力; 另外, 水域面积的增加导致蒸散发量也有所上升, 无法形成有效入渗, 导致地下水补给量减少。以上结论与华北地区近年来的相关研究趋势一致。在黄河流域典型祖厉河流域的研究中, 建设用地扩张显著增加了地表径流而减少了产水量[12]。华北平原 2002~2022 年地下水储量总体呈下降趋势, 农业灌溉用水和居民用水的持续增长加剧了这一态势, 与本研究揭示的建设用地扩张和耕地面积变化对地下水补给的影响方向一致[13]。

3 种极端情景下地下水补给量促进效益排序为草地 > 林地 > 耕地。其中, 草地植被覆盖度低、根系浅、蒸散发弱, 降水入渗阻力小, 消耗少, 因此对地下水补给的促进效应最强; 林地具有改良土壤结构、延长雨水停留时间的优势, 为下渗创造条件; 耕地受农业灌溉引水等影响, 深层入渗能力最弱。Liu 等利用氯离子质量平衡法测定了河北涿州和栾城不同土地利用类型下的地下水补给速率, 结果显示天然植被(含草地)的补给速率为 29.4 mm/a, 而农田因受灌溉影响其水通量远高于天然植被, 但深层有效入渗补给的比例反而低于草地, 与本研究发现的草地促进效应最强、耕地深层入渗能力较弱的结论基本吻合[14]。

2035 年自然延续情景与规划约束情景下多年平均地下水补给量相差 339.47 万 m^3 , 表明延续历史趋势的建设用地扩张将导致地下水补给量进一步大幅下降, 而在国土空间规划约束下控制建设用地总量、适度增加林地和耕地面积则可有效减缓下降趋势, 充分证明土地利用管控政策对区域地下水补给能力具有调控作用, 在涵养地下水方面表现更优。这一结论得到了华北平原多情景模拟研究的佐证。Xu 等通过建立华北平原耦合地表水-地下水模型发现, 南水北调中线工程实施后的河湖生态补水结合政策驱动的农业土地利用调整显著影响了区域地下水位的恢复进程, 表明土地利用管控政策对地下水补给具有显著的调控效应[15]。

5.2. 不足与局限性

本研究仍存在不足之处, 期望在未来的研究中进一步完善:

1) 本文聚焦土地利用变化对地下水补给的驱动效应, 控制土地利用为单一变量, 可降低干扰, 但未考虑未来降水、气温波动对补给的叠加影响。在今后的研究中, 可加入降水、气温、蒸发等其他气候因素作为影响因素, 探讨气候与土地利用变化对地下水补给量的综合影响。

2) 本研究核心聚焦于天然条件下土地利用变化对地下水补给量的独立影响, 未系统考虑农业灌溉回归水补给、地下水人工开采等对地下水系统影响更为直接的强人类活动因素。后续研究可纳入上述多种人类活动要素, 量化其与土地利用变化对地下水补给的协同驱动效应, 完善区域地下水动态演变的多因子分析体系。

3) 本研究采用的 SWAT 模型地下水模块结构相对简化, 将含水层概化为浅层和深层两个线性水库, 难以刻画地下水的三维流动特征与空间异质性。后续研究应考虑耦合 MODFLOW 模型, 构建 SWAT-MODFLOW 集成模型, 以便精细化刻画含水层结构与非饱和带运移机制, 显著提升地下水补给量、水位动态及基流过程的模拟精度。

5.3. 管理建议

结合研究结果可提出如下管理建议: 1) 严守城镇开发边界, 严控新增建设用地规模, 尤其限制平原区耕地向建设用地的无序转化, 缓解建设用地扩张对地下水补给的负面影响。2) 严守生态保护红线, 优化生态空间格局, 结合唐河生态廊道建设提出水源涵养林与生态缓冲带的具体建设方案。3) 严守永久基本农田保护红线, 完善耕地保护与农田补给能力提升路径, 基于研究区种植结构特征, 提出保护性耕作与节水农业推广的具体措施, 实现耕地保护与地下水涵养的共同发展。

6. 结论

1) SWAT 模型率定期与验证期的 R^2 和 E_{ns} 均高于 0.75, 满足模型精度要求, 在唐河流域具有良好的适用性。

2) 1985~2025 年, 唐河流域下游耕地和草地面积分别下降 112.1 km² 和 31.19 km², 建设用地扩张 128.42 km²。使用 Ca-Markov 模型预测 2035 年土地利用, 规划约束情景下耕地、林地、水域面积略有回升, 建设用地面积不变, 土地利用结构趋于优化。

3) 2025 年土地利用下多年平均地下水补给量为 2054.84 万 m³, 相比 1985 年土地利用下降了 668.36 万 m³, 减幅为 24.54%。土地利用类型对地下水补给量的影响排序依次为草地 > 林地 > 耕地。自然延续情景下地下水补给量将进一步锐减至 1637.11 万 m³, 而规划约束情景通过优化土地利用结构, 可有效减缓下降趋势, 仅降至 1976.58 万 m³。

参考文献

- [1] Amanambu, A.C., Obarein, O.A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S.S., Balogun, O., *et al.* (2025) Groundwater System and Climate Change: Present Status and Future Considerations. *Journal of Hydrology*, **589**, Article 125163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>
- [2] Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R.G., *et al.* (2025) Rapid Groundwater Decline and Some Cases of Recovery in Aquifers Globally. *Nature*, **625**, 715-721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- [3] Zhang, J., Liesch, T. and Goldscheider, N. (2026) Impacts of Climate Change and Human Activities on Global Groundwater Storage from 2003 to 2022. *Journal of Hydrology*, **664**, Article 134298. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134298>
- [4] 贺鑫浩, 常桐桐, 乔晓英, 等. 土地利用变化对榆溪河流域地下水文过程的影响[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(6): 41-51.
- [5] 刘柱, 孙霞, 李楠. 国内外水资源评价的研究现状[J]. 科技创新与应用, 2025(17): 53-54.
- [6] 于叶翔. 土地利用变化影响下的三江平原地下水补给量研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [7] Andualem, T.G. and Demeke, G.G. (2019) Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing: A Case Study of Guna Tana Landscape, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **24**, Article 100610. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100610>
- [8] 胡鑫, 吴彬, 高凡, 等. 呼图壁县地下水位动态对土地利用变化响应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 227-234.
- [9] 陆蕴青, 向伟, 李敏, 等. 黄土塬区土地利用变化对地表蒸散的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 89-98.
- [10] 石卫, 雷静, 李书飞, 等. 南水北调中线水源区与海河受水区丰枯遭遇研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 82-87.
- [11] 河北省自然资源厅. 保定市国土空间总体规划(2021-2035 年) [R]. 石家庄: 河北省自然资源厅, 2023. <https://zrgh.baoding.gov.cn/bdzczy/ywzd/cxgh/ghzs/zgh/101007711735929389056.html>, 2025-07-08.
- [12] Liu, Z., Rong, L. and Wei, W. (2023) Impacts of Land Use/Cover Change on Water Balance by Using the SWAT Model in a Typical Loess Hilly Watershed of China. *Geography and Sustainability*, **4**, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.11.006>
- [13] 彭晓枫, 房世波, 韩佳昊, 等. 华北平原地下水储量变化及多源影响因素分析[J]. 遥感学报, 2025, 29(3): 677-688.
- [14] Liu, M., Geng, D., Wu, L., Min, L., Wang, S. and Shen, Y. (2025) The Impact of Agricultural Land Use Change on Water and Nitrate Fluxes in the Deep Vadose Zone, the North China Plain. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **62**, Article 102914. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102914>
- [15] Xu, Y., Long, D., Cui, Y., *et al.* (2024) Groundwater Storage Recovery in the North China Plain: Impacts of River Replenishment, Land Use Change, and Climate Variability. European Geosciences Union General Assembly (EGU24), Vienna, Austria, 14-19 April 2024. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-18915>