

引用格式: 邓雅元, 王美琪, 闫烨琛, 等. 白洋淀上游山区典型流域水源涵养林不同植被优化配置[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 457–467. DENG Yayuan, WANG Meiqi, YAN Yechen, et al. Optimal allocation of different vegetation types for water conservation forests in typical watershed in the upper reaches of Baiyangdian mountainous area[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 457–467.

白洋淀上游山区典型流域水源涵养林不同植被优化配置

邓雅元¹, 王美琪^{1,2}, 闫烨琛^{1,3}, 杨建英¹, 张广英⁴, 王洁⁴, 杨瑾⁵

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国林业出版社有限公司, 北京 100009; 3. 天津市地质工程勘测设计院有限公司, 天津 300191; 4. 保定市水土保持试验站, 河北 保定 071000; 5. 北京水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 【目的】基于水文过程模拟分析, 研究白洋淀上游山区水源涵养林优化配置, 提升该区水源涵养林建设质量。

【方法】以 2016 年为例, 利用 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型验证了白洋淀上游山区安各庄流域本地化过程的适用性, 根据安各庄流域立地条件共划分 63 种立地类型并进行立地质量等级评价。根据立地条件进行水源涵养林空间配置, 再利用 SWAT 模型情景分析模拟不同水源涵养林空间配置下的径流量。【结果】在以调整混交林、针叶林为主的情景下, 流域丰水期径流量比实测值减少 15.79%, 枯水期径流量比实测值增加 15.83%。在空间配置上, 阔叶林主要配置在缓坡和斜坡地, 以阳坡为好; 混交林主要配置在斜坡地和陡坡地; 针叶林主要配置在陡坡地, 以阴坡为好; 灌木林主要配置在斜坡地和陡坡地, 尤其是在土层薄的部位。【结论】在以混交林、针叶林为主的空间配置下, 水源涵养林涵养水源功能发挥最好。图 4 表 5 参 31

关键词: 水源涵养林; 立地类型; SWAT 模型; 敏感性分析; 空间优化配置; 水文响应

中图分类号: S727.21 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0457-11

Optimal allocation of different vegetation types for water conservation forests in typical watershed in the upper reaches of Baiyangdian mountainous area

DENG Yayuan¹, WANG Meiqi^{1,2}, YAN Yechen^{1,3}, YANG Jianying¹, ZHANG Guangying⁴,
WANG Jie⁴, YANG Jin⁵

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. China Forestry Publishing House, Beijing 100009, China; 3. Tianjin Engineering Institute of Investigation & Surveying Design Co., Ltd., Tianjin 300191, China; 4. Baoding City Soil and Water Conservation Test Station, Baoding 071000, Hebei, China; 5. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: 【Objective】Based on hydrological process simulation analysis, this study aims to explore the optimal configuration of water conservation forests in the upper reaches of Baiyangdian mountainous area and improve the quality of water conservation forests. 【Method】Taking 2016 as an example, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was used to verify the applicability of the localization process in Angezhuang watershed in the upper reaches of Baiyangdian. A total of 63 site types were classified according to the site conditions of Angezhuang watershed, and site quality grades were evaluated. The spatial configurations of water conservation forests were carried out according to the site conditions. Then SWAT model was used to simulate the runoff under different spatial configurations of water conservation forests. 【Result】The

收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2024-12-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07110001)

作者简介: 邓雅元 (ORCID: 0000-0002-4603-2193), 博士研究生, 从事水土保持工程、生态修复研究。E-mail:

dengyay0101@163.com。通信作者: 杨建英 (ORCID: 0000-0002-4588-9806), 教授, 博士, 从事水土保持工程、生态修复研究。E-mail: jyyang@bjfu.edu.cn

simulation results showed that under the scenario dominated by mixed and coniferous forests, the runoff of the watershed reduced by 15.79% during the wet season compared with the measured value, and increased by 15.83% during the dry season. In terms of spatial configuration, broad-leaved forests were mainly distributed on gentle slopes and slopes, with sunny slopes as the best. The mixed forests were mainly distributed on slopes and steep slopes. Coniferous forests were mainly distributed on steep slopes, with shade slopes as the best. Shrubs were mainly distributed on slopes and steep slopes, especially in areas with thin soil layers. [Conclusion] Under the spatial configuration dominated by mixed and coniferous forests, water conservation forests have the best function in accommodating water sources. [Ch. 4 fig. 5 tab. 31 ref.]

Key words: water conservation forest; site type; SWAT model; sensitivity analysis; spatial optimal configuration; hydrological response

白洋淀上游山区是雄安新区重要的生态屏障和生态涵养区，承担着供给水源、拱卫新区的重要生态功能。山区面积为 1.71 万 km²，存在森林资源总量不足、分布不均，森林覆盖率较低、结构不合理，水源涵养功能弱、生态防护功能低下等问题，不足以支撑新区建设与发展对生态环境的需求。为推动雄安新区建设国家重大战略实施，国家将白洋淀上游山区水源涵养林与水土保持工程列入“十四五”重点建设内容。未来一定时期内，该区域的水源涵养林建设是林业各级部门一项重要任务，水源涵养林的优化配置是提升水源涵养功能所必需的前提工作。

由于水文变化监测在时序和技术上都有很高的要求，难以短时间反映森林植被变化对水文效应的影响，因此以往有关水源涵养林优化配置的研究大多为定性研究^[1-4]。各种分布式水文模型的出现为定量研究水源涵养林优化配置提供了可能。SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型是一种分布式模型^[5]。该模型以日为基本累加时间，利用地理信息系统提供的各类空间分布信息，模拟多种水文、物理及化学过程^[6-7]，对气象、土壤、土地利用及高程等输入数据精度要求较高。SWAT 模型内置数据依据美国本土气候、植物生理等情况作为基础数据库。中国科研人员对于该模型的研究多集中于模型在国内某一地区的适用性评价，利用其对土地利用进行空间优化配置的研究则较少。本研究选择白洋淀上游山区的安各庄流域建立 SWAT 模型数据库，研究 SWAT 模型在该地区的适用性，对不同植被配置方案下的水文效应进行量化模拟，并在划分安各庄流域立地类型的基础上，对研究区土地利用进行空间调整优化，提出安各庄流域水源涵养林空间优化配置方案，为高质量建设白洋淀上游山区水源涵养林提供科学依据。

1 研究区概况

安各庄流域位于河北省保定市易县西南部，流域总面积为 479 km²。流域内地形起伏较大，高程为 222~1 350 m，地势整体呈西北高、东南低的特点，岩层分布主要为石灰岩、页岩、片麻岩、花岗岩。属于中温带半湿润半干旱大陆性季风气候，多年平均降水量为 385.0 mm。流域内水资源主要来源于南拒马河南支支流的中易水，多年平均径流量为 3.85 亿 m³，枯水季节水量较小，旱年冬春季会出现断流。主要土壤类型为褐土和棕壤，质地为黏土和砂土，土层较薄(约 10~50 cm)。流域内乔木主要为杨树 *Populus*、侧柏 *Platycladus orientalis*、臭椿 *Ailanthus altissima*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、油松 *Pinus tabuliformis*、山杏 *Prunus sibirica*、核桃 *Juglans regia*、构树 *Broussonetia papyrifera* 等；灌木以荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla* 为主，还有少量紫穗槐 *Amorpha fruticosa*、酸枣 *Ziziphus jujuba*、孩儿拳头 *Grewia biloba*、雀儿舌头 *Leptopus chinensis*、绣线菊 *Spiraea salicifolia* 和蚂蚱腿子 *Pertya dioica*；草本主要为艾蒿 *Artemisia lavandulaefolia*、马唐 *Digitaria sanguinalis*、狗尾草 *Setaria viridis* 等。

2 基于 SWAT 模型的流域水文过程模拟

2.1 建立 SWAT 模型数据库

本研究主要数据信息如表 1 所示。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据通过 bigemap 下载获取，用于生成流域的河网水系、流域出口以及进行子流域的划分等工作，同时也用于提取流域的坡度、坡长等数据。土地利用数据为 2014 和 2015 年 2 期经校正融合后，分辨率为 1 m 的高分

2号遥感影像数据。土壤数据为100 m分辨率土壤类型图。将上述数据按照SWAT模型要求的格式进行处理, 投影坐标系为WGS_1984_Albers, 满足建模需求。

表1 数据来源及说明

Table 1 Data sources and description

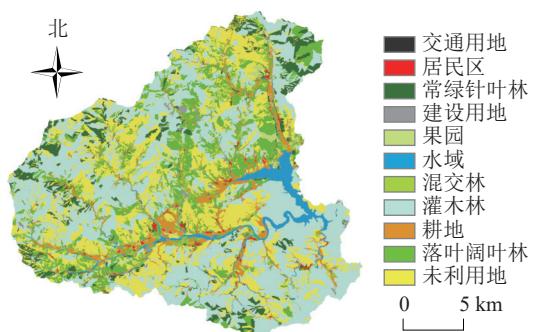
数据名称	格式	规格	来源及说明
DEM数据	栅格	30 m分辨率	http://www.bigemap.com/
土地利用数据	矢量	1 m分辨率	2015年的高分2号遥感影像提取
土壤数据	矢量	1 km分辨率	基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1) (https://www.crensed.ac.cn/portal/metadata/a948627d-4b71-4f68-b1b6-fe02e302af09)
气象数据	文本	2013—2017年逐日1/3°	SWAT模型中国大气同化驱动数据集(CMADS V1.0) (http://westdc.westgis.ac.cn/data/6aa7fe47-a8a1-42b6-ba49-62fb33050492)
安各庄水文站径流量	文本	2014—2018年逐日	中国河北省保定市水文局

2.1.1 土地利用数据库 运行SWAT模型所需的土地利用数据, 包括土地利用类型图及相应的属性表, 参照SWAT模型自带的土地利用类型分类标准及代码, 将获取的土地利用类型数据进行重分类。为了与获取的水文数据和气象数据时间序列相符合, 选择2015年安各庄流域土地利用数据, 按照SWAT土地利用分类标准, 计算安各庄流域各土地利用类型的面积(图1)。各土地利用类型占流域面积百分比如分别为: 灌木林地37.71%、未利用地27.12%、落叶阔叶林地16.32%、常绿针叶林地6.77%、耕地5.36%、水域3.29%、居民区1.35%、果园0.97%、建设用地0.61%、混交林地0.40%、交通用地0.10%。

将以上土地利用数据与SWAT土地利用数据库相近的代码进行匹配, 土地利用数据在SWAT植被数据库中分别用以下代码表示(RNGB、BARR、FRSD、FRSE、AGRL、WATR、URLD、ORCD、UIDU、FRST、UTRN)。

2.1.2 土壤数据库 从世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)中选用本研究的土壤数据。流域内土壤类型有: 石灰性雏形土(calcaric cambisols)、钙积高活性淋溶土(calcaric luvisols)、饱和薄层土(eutric leptosols)、黑色石灰薄层土(rendzic leptosols)、石灰性疏松岩性土(calcaric regosols)、石灰性冲积土(calcaric fluvisols)、简育高活性淋溶土(haplic luvisols)。

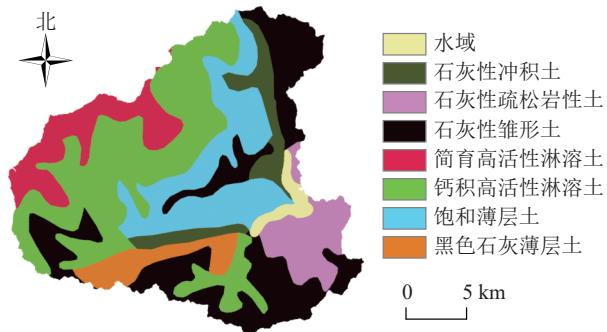
SWAT模型中土壤数据是主要的输入参数之一, 其中最重要的一类数据是土壤粒径级配数据。由于中国的土壤粒径级配标准为国际制, 与SWAT模型采用的美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)简化的美制标准不同, 因此在Matlab平台应用3次样条插值法将数据库中现有的土壤粒径数据转换为美制标准^[8-9]。SWAT模型其余土壤参数都可以通过实测结合土壤水特性软件SPAW计算得出^[10-11]。安各庄流域土壤类型分布如图2所示。



基于河北省自然资源厅标准地图服务网站冀S(2020)030号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图1 安各庄流域土地利用示意图

Figure 1 Land use of Angezhuang watershed



基于河北省自然资源厅标准地图服务网站冀S(2020)030号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图2 安各庄流域土壤类型分布示意图

Figure 2 Distribution of soil type of Angezhuang watershed

2.1.3 气象数据库 气象数据选取SWAT模型中国大气同化驱动数据集(China Meteorological Assimilation Datasets for SWAT Model, CMADS)V1.0数据。该数据集具有多个分辨率(1/3°、1/4°、

1/8°、1/16°)。已有研究表明：该数据集可以很好地匹配中国国家观测站的真实观测数据，弥补中国传统气象站缺乏的问题^[12-14]，在中国区域具有适用性。本研究中，SWAT模型读入了安各庄流域及周边共9个CMADS站点(站点编号为：159-220、159-221、159-222、158-220、158-221、158-222、157-220、157-221、157-222)数据。

2.2 模型建立及运行

应用ArcSWAT 2012模拟安各庄流域径流，建模过程为：划分流域、划分水文响应单元、加载气象数据、建立输入文件、运行模型。

经ArcGIS提取后，流域面积为479.12 km²，共划分为44个子流域及876个水文响应单元。综合CMADS驱动场时间尺度(2008—2017年)及径流观测数据的重合区间，同时为使模拟初期所有水文过程从初始状态进入平衡状态，本研究将模型预热期设置为1 a(2013年)，率定期为2 a(2014和2015年)，验证期为2 a(2016和2017年)。

2.3 模型适用性评价

2.3.1 基于SWAT-CUP的参数敏感性分析 本研究利用SWAT-CUP软件^[15-16]对SWAT模型进行参数敏感性分析、校验及不确定性分析，并依据校准的结果对SWAT模型中各敏感参数取值进行率定，从而提高模型的模拟精度^[17-18]。SWAT-CUP软件通过多元回归模型进行参数敏感性分析。计算公式如下：

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i$$

其中： g 为目标函数； α 、 β_i 为回归方程的系数； b_i 为参数值； m 为参数个数。

采用SUFI-2算法对模型模拟结果进行不确定性分析，同时对模型参数进行敏感性分析和率定，并进一步用于率定模型和精度分析及验证。参数初始取值根据SUFI-2算法敏感性分析中的推荐值确定。运行算法后，SUFI-2算法将自动计算适应性评价指标即纳什效率系数(E_{ns})指标与各参数取值之间的相关性，为下一次运行该算法确定新的推荐参数范围。

2.3.2 模型的适应性评价指标 选取决定系数(R^2)以及 E_{ns} 对模型的适用性进行评价。计算公式为：

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{j=1}^n (Q_{\text{sim},j} - \bar{Q}_{\text{sim}})(Q_{\text{obs},j} - \bar{Q}_{\text{obs}}) \right]^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{sim},j} - \bar{Q}_{\text{sim}})^2 \sum_{j=1}^n (Q_{\text{obs},j} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2}$$

其中： Q_{obs} 为径流量观测值； Q_{sim} 为径流量模拟值； \bar{Q}_{obs} 为径流量观测值平均值； \bar{Q}_{sim} 为径流量模拟值平均值； j 为观测次数。 R^2 越接近于1，模拟效果越好。

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{obs},j} - Q_{\text{sim},j})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{obs},j} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2}$$

当 $Q_{\text{sim}}=Q_{\text{obs}}$ 时， $E_{ns}=1$ 。 E_{ns} 越接近1，表明模型模拟效果越好^[19-20]。 R^2 和 E_{ns} 将模型的模拟结果分为4个级别，依次为极好、较好、可信和不可信^[21]。具体的评价标准如表2。

3 不同植被优化配置情景下的水文响应

3.1 流域立地类型划分

对立地条件进行科学划分是进行空间配置调整的基础工作。以2015年安各庄流域土地利用现状为底图，对研究区森林植被进行空间配置优化。根据研究区现状，选取地貌、地形、土壤3个因子，利用主成分分析法筛选出对该流域立地类型划分影响显著的因子为海拔、坡度、坡向、土壤类型^[22]。地貌划分为中山(海拔 ≥ 800 m)、低山(海拔 < 800 m)；坡度划分(上限排除法)为平地(0°~5°)、缓坡(5°~15°)、

表2 模型模拟结果评价等级

Table 2 Evaluation level of model simulation results

结果评级	R^2	E_{ns}	结果评级	R^2	E_{ns}
极好	$R^2 > 0.85$	$0.75 < E_{ns} \leq 1.00$	可信	$0.50 < R^2 \leq 0.75$	$0.50 < E_{ns} \leq 0.65$
较好	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.65 < E_{ns} \leq 0.75$	不可信	$0 < R^2 \leq 0.50$	$E_{ns} \leq 0.50$

斜坡($15^\circ\sim25^\circ$)、陡坡($25^\circ\sim35^\circ$)、急陡坡($\geq 35^\circ$)；坡向划分为平地、阴坡(北、东北、东、西南)、阳坡(南、东南、西、西北)；土壤类型划分为褐土、棕壤、石质土、潮土、粗骨土。安各庄流域共划分为63种立地类型(表3)。

表3 立地类型表

Table 3 Classification of site types

编号	土壤类型	海拔	坡度	坡向	立地类型	编号	土壤类型	海拔	坡度	坡向	立地类型
1	褐土	低山	陡坡	阳坡	低山陡阳坡褐土	33	潮土	低山	急陡坡	阴坡	低山急陡阴坡潮土
2	褐土	低山	陡坡	阴坡	低山陡阴坡褐土	34	潮土	低山	平地	—	低山平地潮土
3	褐土	低山	缓坡	阳坡	低山缓阳坡褐土	35	潮土	低山	斜坡	阳坡	低山斜阳坡潮土
4	褐土	低山	缓坡	阴坡	低山缓阴坡褐土	36	潮土	低山	斜坡	阴坡	低山斜阴坡潮土
5	褐土	低山	急陡坡	阳坡	低山急陡阳坡褐土	37	棕壤	低山	陡坡	阳坡	低山陡阳坡棕壤
6	褐土	低山	急陡坡	阴坡	低山急陡阴坡褐土	38	棕壤	低山	陡坡	阴坡	低山陡阴坡棕壤
7	褐土	低山	平地	—	低山平地褐土	39	棕壤	低山	缓坡	阳坡	低山缓阳坡棕壤
8	褐土	低山	斜坡	阳坡	低山斜阳坡褐土	40	棕壤	低山	缓坡	阴坡	低山缓阴坡棕壤
9	褐土	低山	斜坡	阴坡	低山斜阴坡褐土	41	棕壤	低山	急陡坡	阳坡	低山急陡阳坡棕壤
10	褐土	中山	陡坡	阳坡	中山陡阳坡褐土	42	棕壤	低山	急陡坡	阴坡	低山急陡阴坡棕壤
11	褐土	中山	陡坡	阴坡	中山陡阴坡褐土	43	棕壤	低山	平地	—	低山平地棕壤
12	褐土	中山	缓坡	阳坡	中山缓阳坡褐土	44	棕壤	低山	斜坡	阳坡	低山斜阳坡棕壤
13	褐土	中山	缓坡	阴坡	中山缓阴坡褐土	45	棕壤	低山	斜坡	阴坡	低山斜阴坡棕壤
14	褐土	中山	急陡坡	阳坡	中山急陡阳坡褐土	46	棕壤	中山	陡坡	阳坡	中山陡阳坡棕壤
15	褐土	中山	急陡坡	阴坡	中山急陡阴坡褐土	47	棕壤	中山	陡坡	阴坡	中山陡阴坡棕壤
16	褐土	中山	平地	—	中山平地褐土	48	棕壤	中山	缓坡	阳坡	中山缓阳坡棕壤
17	褐土	中山	斜坡	阳坡	中山斜阳坡褐土	49	棕壤	中山	缓坡	阴坡	中山缓阴坡棕壤
18	褐土	中山	斜坡	阴坡	中山斜阴坡褐土	50	棕壤	中山	急陡坡	阳坡	中山急陡阳坡棕壤
19	石质土	低山	陡坡	阳坡	低山陡阳坡石质土	51	棕壤	中山	急陡坡	阴坡	中山急陡阴坡棕壤
20	石质土	低山	陡坡	阴坡	低山陡阴坡石质土	52	棕壤	中山	平地	—	中山平地棕壤
21	石质土	低山	缓坡	阳坡	低山缓阳坡石质土	53	棕壤	中山	斜坡	阳坡	中山斜阳坡棕壤
22	石质土	低山	缓坡	阴坡	低山缓阴坡石质土	54	棕壤	中山	斜坡	阴坡	中山斜阴坡棕壤
23	石质土	低山	急陡坡	阳坡	低山急陡阳坡石质土	55	粗骨土	低山	陡坡	阳坡	低山陡阳坡粗骨土
24	石质土	低山	急陡坡	阴坡	低山急陡阴坡石质土	56	粗骨土	低山	陡坡	阴坡	低山陡阴坡粗骨土
25	石质土	低山	平地	—	低山平地石质土	57	粗骨土	低山	缓坡	阳坡	低山缓阳坡粗骨土
26	石质土	低山	斜坡	阳坡	低山斜阳坡石质土	58	粗骨土	低山	缓坡	阴坡	低山缓阴坡粗骨土
27	石质土	低山	斜坡	阴坡	低山斜阴坡石质土	59	粗骨土	低山	急陡坡	阳坡	低山急陡阳坡粗骨土
28	潮土	低山	陡坡	阳坡	低山陡阳坡潮土	60	粗骨土	低山	急陡坡	阴坡	低山急陡阴坡粗骨土
29	潮土	低山	陡坡	阴坡	低山陡阴坡潮土	61	粗骨土	低山	平地	—	低山平地粗骨土
30	潮土	低山	缓坡	阳坡	低山缓阳坡潮土	62	粗骨土	低山	斜坡	阳坡	低山斜阳坡粗骨土
31	潮土	低山	缓坡	阴坡	低山缓阴坡潮土	63	粗骨土	低山	斜坡	阴坡	低山斜阴坡粗骨土
32	潮土	低山	急陡坡	阳坡	低山急陡阳坡潮土						

说明: —表示无坡向。

3.2 流域水源涵养林空间优化配置方案

一般运用情景设计方法来研究土地利用变化对研究区水文的影响, 如果需要定量分析不同土地利用

类型对径流的影响,还要结合水文模型^[23-25]。本研究采用土地利用空间配置法,在当前土地利用类型基础上,结合研究区的社会经济条件、工农业发展以及管理政策,综合考虑土地利用的空间优化配置情况。

为了寻求当前气候条件下该流域的最佳水源涵养林空间配置情景方案,经实地考察,收集安各庄流域的土地利用资料,结合研究区立地类型发现:安各庄流域分布有大面积的未利用地和灌木林地,林分类型较为单一,耕地分布不够合理。针对以上问题,以提高流域森林水源涵养能力为目标,设定了3种不同的森林类型比例及空间配置方案。这3种不同的森林类型比例及空间配置方案依据的是前人对白洋淀上游山区其他流域的已有研究成果^[26-28],以及对该流域提出的不同立地条件的林分类型及植物种的建议^[29]。

方案一:土地利用以调整混交林、未利用地为主,耕地、果园、建设用地、交通和水域全部保留,在缓坡地和平地依据立地条件配置针叶林、阔叶林和混交林;低山陡坡地在土层薄的位置不予利用,依据立地条件,在其他土地上配置针叶林、阔叶林和混交林;保持斜坡地现有的灌木林,其他土地上配置混交林,立地条件较差的部位不予利用。

方案二:土地利用以调整混交林、阔叶林为主,全部保留位于中低山沟谷的耕地、建设用地和水域;将缓坡地的耕地和建设用地调整为阔叶林和混交林;斜坡地在土层薄的位置不予利用,依据立地条件,在其他土地上配置针叶林、阔叶林和混交林;陡坡地配置混交林和针叶林,立地条件差的部位不予利用。

方案三:土地利用以调整混交林、针叶林为主,全部保留位于中低山沟谷耕地、建设用地和水域;水域周围配置耕地和建设用地;缓坡地配置混交林和阔叶林;依据立地条件,在斜坡地上配置阔叶林、针叶林和混交林;陡坡地配置针叶林、混交林和灌木林,立地条件较差的部位不予利用。3种配置方案的面积如表4所示。

表4 3种优化配置方案各地类面积统计

Table 4 Statistics of 3 optimized configuration schemes of area

土地利用类型	2015年		方案一(以调整混交林、未利用地为主)		方案二(以调整混交林、阔叶林为主)		方案三(以调整混交林、针叶林为主)	
	面积/km ²	比例/%						
耕地	25.66	5.36	25.66	5.36	13.52	2.82	26.37	5.50
建设用地	2.92	0.61	2.92	0.61	2.92	0.61	1.30	0.27
灌木	180.68	37.71	152.80	31.89	147.23	30.73	110.62	23.09
混交林	1.91	0.40	67.18	14.02	83.22	17.37	75.72	15.80
交通用地	0.49	0.10	0.49	0.10	0.49	0.10	0.49	0.10
居民区	6.47	1.35	6.47	1.35	6.47	1.35	6.47	1.35
阔叶林	78.19	16.32	74.83	15.62	31.65	6.61	104.00	21.71
常绿针叶林	32.42	6.77	28.79	6.01	14.36	3.00	50.55	10.55
果园	4.67	0.97	4.67	0.98	4.67	0.98	4.67	0.97
水域	15.77	3.29	15.77	3.29	15.77	3.29	15.77	3.29
未利用地	129.93	27.12	99.52	20.77	158.81	33.15	83.15	17.35

4 结果与分析

4.1 SWAT模型参数敏感性分析及校准

SWAT模型涉及大量参数,通过多次迭代计算,系统筛选出10个对模型预测结果影响最为明显的参数。模型中仅给出了参数的取值范围,本研究通过遥感与地面调查相结合的方法,对流域内的地形地貌、植被、土壤、河道状况等进行了调查。以此为基础,分类分块确定模型参数值,之后按面积或长度进行加权平均,计算出参数的最终校准值。参数含义及校准值如表5所示。

4.2 模型率定与验证

在对敏感性参数取值进行反复调整后,使模型率定期的模拟值逐渐接近实测值,直到模型平衡后,

表5 模型径流参数率定结果

Table 5 Model runoff parameter calibration results

参数含义	排序	取值范围	最终校准值	参数含义	排序	取值范围	最终校准值
SCS径流曲线数(CN2)	1	-0.20~0.20	0.16	最大冠层截留量(CANMX)	6	0~100.00	16.67
河道有效渗透系数(CH_K2)	2	5.00~130.00	88.64	基流alpha因子(ALPHA_BF)	7	0~1.00	0.28
土壤蒸发补偿系数(ESCO)	3	0~1.00	0.45	地下水延长时间(GW_DELAY)	8	0~500.00	55.00
表层土壤饱和渗透系数[SOL_K(1)]	4	0~2 000.00	253.00	主河道曼宁系数(CH_N2)	9	0~1.00	0.10
表层土壤持水系数[SOL_AWC(1)]	5	0~1.00	0.72	表层土壤容重[SOL_BD(1)]	10	0.90~2.50	1.14

说明: 括号中为参数符号。

模型表现为: $R^2=0.92$, $E_{ns}=0.89$, 表明该模拟结果能极大地满足要求。验证期的率定精度比率定期稍差, $R^2=0.90$, $E_{ns}=0.89$, 但也满足模拟的精度要求, 说明该模型模拟径流量的结果较为精准, 在安各庄流域适用性良好。率定期及验证期径流量实测值与模拟结果如图3所示。

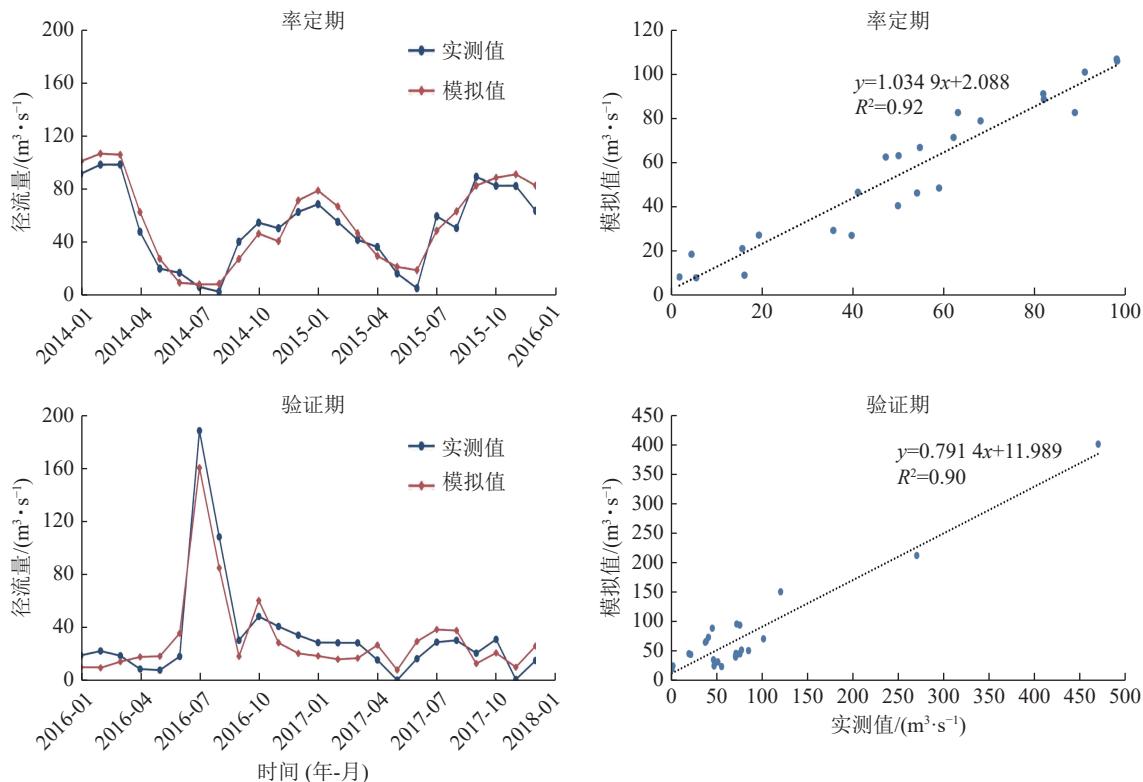


图3 月径流量率定期和验证期模拟结果

Figure 3 Periodic simulation results and verification period simulation results of monthly runoff rate

4.3 优化配置方案的水文响应结果

通常把降低丰水期洪峰流量、增加枯水期枯水流量的径流调蓄作用作为水源涵养林的水源涵养功能。根据所建立的3种方案, 结合安各庄流域现有气象数据, 以2016年为例, 利用SWAT模型分别模拟了在相同的降水条件下, 不同水源涵养林空间配置下的产流情况。在消除降水对径流的影响后, 分析水源涵养林空间配置变化对径流量的影响, 从而综合比较不同配置模式下水源涵养功能差异性。

由图4可以看出: 本研究提出3种空间配置情景方案与2016年实测结果基本一致, 丰水期均为6—9月, 枯水期为1—4月, 最大月平均径流量出现在7月, 与降雨量呈正相关关系。3种空间配置情景方案下的径流量变化与实测值均呈极显著正相关($P<0.01$), 且变化趋势一致。2016年实测平均径流量为 $113.48\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 丰水期月平均径流量为 $215.41\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 枯水期月平均径流量为 $43.03\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在方案一空间配置模式下, 丰水期月平均径流量减少 $31.76\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 其中7月减少幅度最大; 枯水期月平均径流量增加 $7.54\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, 其中2月增加幅度最大。经计算, 丰水期月平均径流量平均减少

13.30%，枯水期月平均径流量平均增加 17.87%。结果表明：在方案一配置模式下，水源涵养林调蓄径流的功能有所提高。灌木林所占面积与实际情况一致，为占比最大的林分类型，混交林和阔叶林所占比例相近，混交林所占面积明显增加，所以提高了流域水源涵养林涵养水源调蓄径流的能力。

在方案二空间配置模式下，丰水期月平均径流量增加 $18.94 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，其中 7 月增加幅度最大；枯水期月平均径流量增加 $6.51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，其中 2 月增加幅度最大。经计算，丰水期月平均径流量平均增加 11.23%；枯水期月平均径流量平均增加 16.19%。结果表明：在方案二配置模式下，水源涵养林产流全面提高。混交林和灌木林所占面积最大，针叶林和阔叶林所占比例相近，整体森林覆盖率有所下降，所以增加了流域产流，但丰水期的产流增加可能导致洪水等灾害，所以方案二不利于流域涵养水源。

在方案三空间配置模式下，丰水期月平均径流量减少 $34.62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，其中 7 月减少幅度最大；枯水期月平均径流量增加 $7.10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，其中 2 月增加幅度最大。经计算，丰水期月平均径流量平均减少 15.79%；枯水期月平均径流量平均增加 15.83%。结果表明：在方案三配置模式下，研究区丰水期径流减少同枯水期径流增加幅度都较为明显，总体来说，调蓄径流效果优于方案一和方案二。灌木林、混交林、阔叶林面积相近，均占研究区 20.00% 左右，针叶林主要栽植在立地条件较差的陡坡，面积相对较小，研究区森林覆盖率整体上升 9.95%。

5 讨论

对比各个情景下年内逐月径流变化发现：混交林面积增加，研究区丰水期径流量减少，枯水期径流量增加，径流的年内分配趋于均匀。这与以往研究发现混交林涵养水源能力最强的结论一致^[30-31]。

方案一仅对林地和未利用地进行调整，工作量小，且水源涵养林调蓄径流效果明显，但由于未考虑到斜坡和陡坡上的耕地，容易造成坡面水土流失。方案二对立地条件不适宜的耕地做出了调整，流域出流全面提升，但当丰水期径流量的增大，会导致洪水风险增加，不利于涵养水源。方案三的水源涵养林空间配置在丰水期径流减少和枯水期径流增加较为明显，且区域森林覆盖率增加，土地利用状况较为合理。在方案三的配置模式下，森林调蓄径流、涵养水源的效果最好，耕地、交通用地、建设用地、果园面积变化不大，但都调整到更有利于生产生活的空间位置，对当地居民生活未造成不利影响，因此，方案三为研究区水源涵养林的较优配置模式。在方案三空间配置模式下，研究区水源涵养林覆盖率(不含果园)由 23.49% 增加到 48.06%，覆盖率增加了 24.57%。

确定森林类型比例及空间配置对于安各庄流域水源涵养林格局优化具有重要指导意义。本研究提出的优化配置方案可在白洋淀流域上游低山区其他流域推广应用。但在实际工作中，水源涵养林的营造和结构的调整是一个漫长的过程，需要当地决策部门制定发展战略和相应的规划，并进行更加细致的指导。

SWAT 模型不能对单次降水进行模拟，同时，径流和泥沙通常同步进行分析，但本研究缺少泥沙数据，只从径流方面分析了水源涵养林的涵养水源功能。这些都需要在今后的研究中加以完善和提高。

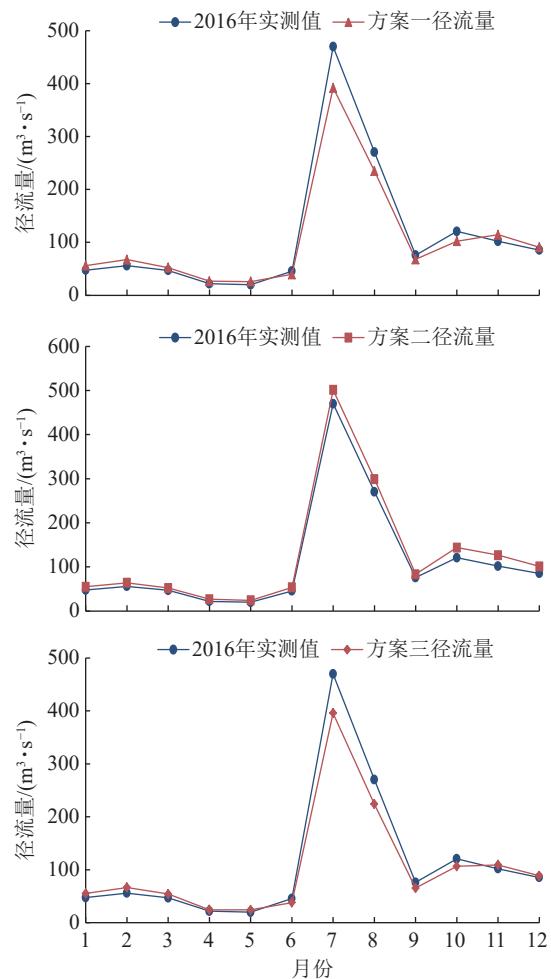


图 4 2016 年不同优化配置方案下的径流曲线

Figure 4 Runoff curves under different optimized configuration schemes in 2016

6 结论

通过 SWAT 模型灵敏性分析, 得出 SWAT 模型月校准期的决定系数为 0.92, 纳什效率系数为 0.89, 表明该模型模拟径流量的结果较为精准, 在安各庄流域适用性良好。对 2016—2017 年研究区的水文生态效应进行模拟, 得到月验证期的决定系数为 0.90, 纳什效率系数为 0.89, 结论与实际情况基本一致, 验证了模型在安各庄流域的适用性。

选择地貌、坡度、坡向、土壤类型 4 个因子, 对安各庄流域立地条件进行划分, 共分为 63 种立地类型, 利用 SWAT 模型模拟不同水源涵养林空间配置下的径流量。模拟结果显示: 方案三(以调整混交林、针叶林为主)的情景下, 在森林覆盖率为 71.15%, 森林类型占比为阔叶林 21.71%, 针叶林 10.55%, 混交林 15.80%, 灌木林 23.09% 的情况下, 流域丰水期径流量比 2016 年实测值减少 15.79%, 枯水期径流量比 2016 年实测值增加 15.83%。水源涵养林涵养水源功能发挥最好。

在空间配置上, 阔叶林主要配置在缓坡和斜坡地, 以阳坡为好; 混交林主要配置在斜坡地和陡坡地; 针叶林主要配置在陡坡地, 以阴坡为好; 灌木林主要配置在斜坡地和陡坡地, 尤其是在土层薄的部位。

7 参考文献

- [1] 崔悦, 闫冰, 李治学, 等. 坝上地区典型防护林水源涵养功能对林分结构的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2024, **46**(9): 77–86.
CUI Yue, YAN Bing, LI Zhixue, *et al.* Response of water conservation function of typical protective forests in Bashang area of northern China to stand structure[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, **46**(9): 77–86.
- [2] 朱柱, 杨海龙, 黄乾, 等. 青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(6): 1166–1173.
ZHU Zhu, YANG Hailong, HUANG Qian, *et al.* Health evaluation of typical water conservation forests in the alpine loess area of Qinghai[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(6): 1166–1173.
- [3] 郑江坤, 魏天兴, 朱金兆, 等. 黄土丘陵区自然恢复与人工修复流域生态效益对比分析[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(6): 990–1000.
ZHENG Jiangkun, WEI Tianxing, ZHU Jinzhao, *et al.* Contrast analysis of ecological benefit between artificial restoration areas and natural restoration areas in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(6): 990–1000.
- [4] 朱金兆, 魏天兴, 张学培. 基于水分平衡的黄土区小流域防护林体系高效空间配置[J]. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(5/6): 5–13.
ZHU Jinzhao, WEI Tianxing, ZHANG Xuepei. Arrangement of protective forest system in gullied-hilly loess area based on water balance[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(5/6): 5–13.
- [5] 于峰, 史正涛, 李滨勇, 等. SWAT 模型及其应用研究[J]. *水科学与工程技术*, 2008(5): 4–9.
YU Feng, SHI Zhengtao, LI Binyong, *et al.* Discussion on SWAT model and its application[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2008(5): 4–9.
- [6] CAI Yunfei, ZHANG Fei, SHI Jingchao, *et al.* Enhancing SWAT model with modified method to improve eco-hydrological simulation in arid region[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **403**: 136891 [2024-09-22]. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.136891](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136891).
- [7] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, *et al.* SWAT: model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, **55**(4): 1491–1508.
- [8] PARAJULI P B, NELSON N O, FREES L D, *et al.* Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas[J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(5): 748–763.
- [9] 周群. 分布式水文模型 SWAT 在黄河源区径流模拟中的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
ZHOU Qun. *Study on Applicability of Distributed Hydrological Model SWAT on Runoff Simulation in the Source Region of the Yellow River*[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [10] 汪月月, 吕继军, 马金珠. 基于 SWAT 模型的马莲河流域地下水资源评价[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2024, **60**(4): 435–441.
WANG Yueyue, LÜ Jijun, MA Jinzhu. Evaluation of groundwater resources in the Malian River Basin based on the SWAT model[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2024, **60**(4): 435–441.

- [11] 尹思危, 王跃峰, 周琨鸿, 等. 三峡库区小流域景观格局变化洪枯径流效应及归因分析[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 7962–7976.
YIN Siwei, WANG Yuefeng, ZHOU Kunhong, et al. Runoff extreme responses to watershed landscape pattern changes and their attribution analysis in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18): 7962–7976.
- [12] 蒋凯鑫, 莫淑红, 李平治, 等. 长江上游凯江流域径流侵蚀功率时空分布与输沙关系[J]. 泥沙研究, 2024, 49(4): 21–26.
JIANG Kaixin, MO Shuhong, LI Pingzhi, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution of runoff erosion power and its relationship with sediment transport in the Kaijiang River Basin of the Upper Yangtze River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(4): 21–26.
- [13] 王倩华, 张攀, 王伟, 等. 黄河中游典型流域土地利用对径流的调控作用[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 61–68, 78.
WANG Qianhua, ZHANG Pan, WANG Wei, et al. Regulation of land use on runoff in typical watersheds of the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 61–68, 78.
- [14] LI Zhaoguang, JIAN Shan, GU Rui, et al. Runoff simulation under the effects of the modified soil water assessment tool (SWAT) model in the jiyun river basin[J/OL]. *Water*, 2023, 15(11): 2110 [2024-09-22]. DOI: [10.3390/w15112110](https://doi.org/10.3390/w15112110).
- [15] ROTH V, NIGUSSIE T K, LEMANN T. Model parameter transfer for streamflow and sediment loss prediction with SWAT in a tropical watershed[J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(19): 1321 [2024-09-22]. DOI: [10.1007/s12665-016-6129-9](https://doi.org/10.1007/s12665-016-6129-9).
- [16] AYELE G, TESHALE E, YU Bofu, et al. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the upper Blue Nile River basin, BEthiopia[J/OL]. *Water*, 2017, 9(10): 782 [2024-09-22]. DOI: [10.3390/w9100782](https://doi.org/10.3390/w9100782).
- [17] BEHARRY S L, GABRIELS D, LOBO D, et al. Use of the SWAT model for estimating reservoir volume in the Upper Navet watershed in Trinidad[J/OL]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(2): 163 [2024-09-22]. DOI: [10.1007/s42452-021-04201-7](https://doi.org/10.1007/s42452-021-04201-7).
- [18] 杨军军, 高小红, 李其江, 等. 湿水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 82–88, 93.
YANG Junjun, GAO Xiaohong, LI Qijiang, et al. SWAT model construction and uncertainty analysis on its parameters for the Huangshui River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 82–88, 93.
- [19] 朱宇颐, 解潍嘉, 黄华国. 基于三维模型 ENVI-met 对黑河森林和北方森林的潜热及显热通量模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 440–452.
ZHU Yuyi, XIE Weijia, HUANG Huaguo. Modeling sensible flux and latent flux in Heihe and boreal forests based on a 3D ENVI-met model[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(3): 440–452.
- [20] 杨祎. SWAT 模型径流模拟的不确定性研究——以东苕溪上游小流域为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
YANG Yi. *The Uncertainty in Runoff Simulation Modeled by SWAT: A Case Study in the Upstream Catchment of Tiao River Watershed*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [21] 韩芦. 大理河流域水沙变化特征的模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
HAN Lu. *Simulation Study on the Characteristics of Water and Sediment Change in Dali River Basin*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [22] 朱长青, 邢喜云, 于振海, 等. 基于主成分分析的黄土区小流域立地类型划分[J]. 内蒙古林业调查设计, 2011, 34(1): 49–50, 71.
ZHU Changqing, XING Xiyun, YU Zhenhai, et al. Subdivision of small watershed site types in Loess Region based on principal component analysis[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2011, 34(1): 49–50, 71.
- [23] MATTOO D, AHMAD MIR S, BHAT M S, et al. Modelling the impact of climate variability and LULC changes on the hydrological processes in the upper Jhelum basin catchment, western-Himalayas[J]. *Water Resources*, 2023, 50(2): 215–230.
- [24] ASTITE S W, KERMANI S, DJEDIAT Y. The influence of the land use land cover (LULC) change on hydrological response in urbanized watersheds: case study of Wadi Koriche and Wadi Kniss watersheds, northern Algeria[J/OL]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2023, 16(4): 242 [2024-09-22]. DOI: [10.1007/s12517-023-11350-z](https://doi.org/10.1007/s12517-023-11350-z).
- [25] 祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提·莫合塔尔, 等. 基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5149–5157.
Zubaidai Muyibul, SHI Qingdong, Polat Muhtar, et al. Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: a SWAT model based analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5149–5157.

- [26] 杨凝. 大清河上游山区典型小流域水源涵养功能评价及造林设计[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
YANG Ning. *Evaluation of Water Conservation Function and Afforestation Design of Typical Small Watershed in the Upper Reaches of Daqing River*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [27] 公博. 冀北山地主要人工林水源涵养能力评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
GONG Bo. *The Water Conservation Capacity of Major Plantations in Northern Mountain Area of Hebei Province*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [28] 朱丽. 华北土石山区流域防护林空间优化配置[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
ZHU Li. *Space Optimization of Protective Forest of the Basin in Rocky Mountain Area of North China*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [29] 王美琪. 大清河流域上游山丘区典型小流域水源涵养林优化配置研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
WANG Meiqi. *Research on Optimal Allocation of Water Conservation Forests in Typical Small Watersheds in Hilly Regions of Daqing River Basin*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [30] 公博, 师忱, 何会宾, 等. 冀北山区 6 种人工林的林地水源涵养能力[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 165–170.
GONG Bo, SHI Chen, HE Huibin, et al. The water conservation capacity of 6 kinds of planted forests in northern mountain area of Hebei Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(3): 165–170.
- [31] 张佳楠, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 105–114.
ZHANG Jia'nan, ZHANG Jianjun, ZHANG Haibo, et al. Water conservation capacity of typical forestlands in the Loess Plateau of Western Shanxi Province of northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(8): 105–114.