

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.031 CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.031

林佳雯, 贾国栋, 余新晓. 基于生态水文最优性理论的坝上高原-乌兰察布地区植被承载力模拟[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 310-319.

LIN Jiawen, JIA Guodong, YU Xinxiao. Simulation of vegetation carrying capacity in Bashang Plateau-Ulanqab region based on ecohydrological optimality theory[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 310-319.

## 基于生态水文最优性理论的坝上高原-乌兰察布地区植被承载力模拟

林佳雯<sup>1,3</sup>, 贾国栋<sup>1,2,3</sup>, 余新晓<sup>1,3</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083;

3. 北京林业大学首都圈森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 以坝上高原与乌兰察布地区为研究区域, 基于Eagleson生态水文模型, 模拟在多年平均气候条件下的最优植被覆盖度, 揭示气候水分约束下的植被承载力格局。 [方法] 利用2000—2020年MODIS NDVI数据和NOAA逐日气象数据, 提取生长季实际植被覆盖度及降水过程参数, 并结合中国高分辨率土壤水文数据集开展模型模拟与拟合验证。 [结果] 最优植被覆盖度整体呈由西向东逐渐升高的趋势, 与多年平均实际覆盖度空间格局基本一致, 相关系数为0.747, 均方根误差为0.118 9, 表明模型适用于本区域。分区分析显示, 东部地区因人工造林、灌溉等干预, 实际覆盖度普遍高于模拟值; 中部过渡区拟合效果较好, 西部干旱区则受水分限制显著, 植被覆盖度均较低。进一步结合水热因子分析发现, 降水是主控因素, 气温通过调节蒸散发影响有效水分供应。 [结论] 研究成果可为区域生态恢复潜力评估、植被格局优化及水资源调控提供理论依据和技术支持。

**关键词:** 最优植被覆盖度; Eagleson生态水文模型; 植被承载力; 坝上高原; 乌兰察布

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0310-10

## Simulation of Vegetation Carrying Capacity in Bashang Plateau-Ulanqab Region Based on Ecohydrological Optimality Theory

LIN Jiawen<sup>1,3</sup>, JIA Guodong<sup>1,2,3</sup>, YU Xinxiao<sup>1,3</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory for Efficient Utilization of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. National Forest Ecosystem Research Station of Capital Circle, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] Taking the Bashang Plateau-Ulanqab region as the study area, this study applies the Eagleson ecohydrological model to simulate the optimal vegetation cover under multi-year average climatic conditions, aiming to reveal the pattern of vegetation carrying capacity constrained by water availability. [Methods] MODIS NDVI data from 2000 to 2020 and daily meteorological data from NOAA were used to extract actual vegetation cover during the growing season and precipitation process parameters. The model was subsequently run and validated using China's high-resolution soil hydrological dataset. [Results] The optimal vegetation cover generally increased from west to east, which was largely consistent with the spatial pattern of the multi-year average actual cover, with a correlation coefficient of 0.747 and a root mean square error (RMSE) of 0.118 9, demonstrating the model's applicability to this region. Regional analysis revealed that in the eastern region, actual vegetation cover generally exceeded the simulated values due to human interventions such as afforestation and irrigation. The central transitional zone exhibited a good fit, while the western arid zone was significantly constrained by water availability, resulting in overall low vegetation cover. Further analysis of hydrothermal factors revealed that precipitation was the dominant controlling factor, while air

收稿日期: 2025-03-23 修回日期: 2025-07-24 录用日期: 2025-07-30 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-09-25

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF1305302); 国家自然科学基金项目 (42230714)

第一作者: 林佳雯 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事植被承载力、生态水文研究。E-mail: atomeom@163.com

通信作者: 贾国栋 (1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、生态水文研究。E-mail: jgd3@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

temperature affected the effective water availability by regulating evapotranspiration. [Conclusion] The findings provide a theoretical basis and technical support for assessing regional ecological restoration potential, optimizing vegetation patterns, and regulating water resources.

**Keywords:** optimal vegetation cover; Eagleson ecohydrological model; vegetation carrying capacity; Bashang Plateau; Ulanqab

Received: 2025-03-23

Revised: 2025-07-24

Accepted: 2025-07-30

Online(www.cnki.net): 2025-09-25

坝上高原与乌兰察布地区位于我国北方干旱与半干旱区的过渡地带,地势起伏较大,降水总量偏少且年际波动明显,区域水资源时空分布不均。受自然条件限制,该地区整体生态系统较为脆弱,风蚀与水蚀现象普遍,局部地区恢复力较差,生态退化风险处于中等<sup>[1]</sup>。该地区也是京津风沙源区的主要策源地<sup>[2]</sup>,是维护京津冀地区生态安全的关键屏障。

为应对生态退化问题,自1978年起,国家在包括本研究区在内的“三北地区”启动了大规模防护林体系建设工程,即“三北”防护林工程。经过40余年的持续推进,区域植被覆盖度显著提升,沙尘暴发生频率有所减少,空气质量也得到改善,生态屏障功能逐步增强<sup>[3]</sup>。其中,乌兰察布与坝上高原一带作为京津风沙源治理工程的重要组成部分,在减缓沙尘源扩散、保护京津冀生态安全方面发挥了重要作用<sup>[4]</sup>。

然而,近年来受全球气候变化和水资源紧张的双重压力影响,区域生态系统稳定性面临新的挑战。部分人工林出现不同程度退化甚至死亡现象,防护功能减弱,区域植被恢复呈波动趋势<sup>[5]</sup>。已有研究<sup>[6]</sup>表明,该区域人工林退化的重要原因在于土壤水分补给不足与林木蒸腾耗水之间的不平衡。气候暖干化背景下,有限的降水难以支撑高强度人工干预所形成的植被格局,进而导致土壤水分长期亏缺,生态系统稳定性降低<sup>[7]</sup>。水分可利用性已经成为制约区域生态修复的关键因素。

因此,在干旱半干旱自然背景下,科学模拟并评估植被的最优覆盖状态,厘清自然水文气候条件下的植被承载力,对区域生态恢复与植被格局优化具有重要意义<sup>[8]</sup>。植被在气候调节、水源涵养及生态平衡中的核心作用已被广泛认知<sup>[9]</sup>,而植被承载力作为定量描述“水-植”协调关系的关键指标,在植被恢复管理和生态建设中具有重要参考价值<sup>[10]</sup>。

目前,围绕干旱半干旱地区“水-植”关系的研究尚存在不足。现有研究<sup>[11]</sup>多集中在局地或流域尺度,缺乏对大尺度异质性生态系统的系统性刻画,尤其是在东西向过渡的复杂地貌背景下,区域内气候水分主控因子的空间作用格局及其对植被系统承载

能力的调节作用,仍缺乏定量化认识。

本文围绕以下科学问题展开讨论,在多年平均气候条件下,区域可实现的最优植被覆盖度是否存在显著的空间分布特征?在复杂地貌与干旱半干旱生态系统背景下,气候水分如何具体约束植被承载力,其空间差异特征表现为何?

为回应上述问题,本文引入基于水量平衡的Eagleson生态最优性理论,假设在平均气候与土壤条件下,植被系统会自然趋向一个最优的覆盖水平,以实现水分获取与消耗的动态平衡<sup>[12]</sup>。该理论无需经验参数调试<sup>[13]</sup>,可结合遥感与气象数据,刻画自然状态下的生态调节机制<sup>[14]</sup>。本研究将基于该理论,结合NDVI遥感数据与气象数据,模拟坝上高原与乌兰察布地区的植被承载力空间格局,揭示干旱半干旱地区复杂地貌背景下的“水-植”协调机制,为区域生态恢复潜力评估和生态工程优化配置提供理论支撑和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究以坝上高原与乌兰察布地区(38°51′~43°21′N,105°16′~119°13′E)为研究区(图1)。该区西起内蒙古自治区乌拉特后旗,东至河北省平泉市,南起山西省代县,北至内蒙古自治区四子王旗,东西距离约1170 km,南北距离约500 km,总面积约为26万km<sup>2</sup>,涵盖内蒙古自治区、山西省、北京市、河北省和天津市的总计83个县(旗、市、区)。

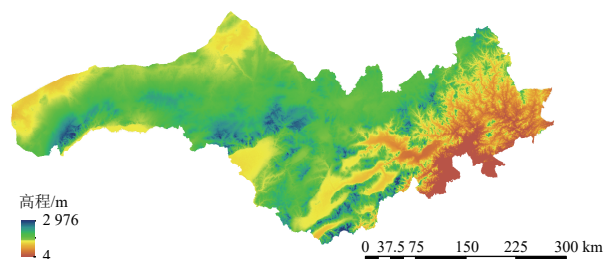


图1 坝上高原与乌兰察布地区地理位置与高程  
Fig.1 Geographic location and elevation of Bashang Plateau-Ulanqab region

该区域地处温带干旱半干旱至半湿润气候带,地貌特征以高原、山地和丘陵为主。研究区向西延伸至

阴山山脉与坝上高原的过渡地带,地形多低山丘陵和波状高原,海拔 1 200~1 600 m,地势起伏较大<sup>[15]</sup>;东部坝上高原位于华北平原与内蒙古高原的过渡区域,海拔 1 100~1 400 m,整体地势较为平缓,具有典型的高原草甸和森林草原景观<sup>[16]</sup>。降水量自西向东递增,水资源分布不均,生态环境较为脆弱<sup>[17]</sup>。

## 1.2 数据来源与处理

1.2.1 植被参数 本研究以归一化植被指数 NDVI 为基础计算植被覆盖度  $M$ ,以量化研究区的植被状况。所使用的 NDVI 数据来自 MODIS 传感器提供的 MOD13Q1 NDVI 产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,数据时间覆盖范围为 2000—2020 年。数据的下载与预处理工作通过 GEE 平台完成,对 NDVI 数据进行质量控制,包括异常值剔除和缺失值处理,并采用生长季最大值合成法进行处理。植被覆盖度  $M$  的估算采用像元二分模型的经验公式进行计算:

$$M = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (1)$$

式中: $\text{NDVI}_{\max}$  和  $\text{NDVI}_{\min}$  分别为研究区内纯植被和纯裸土的 NDVI 值。该方法能够较准确地表征研究区内植被覆盖的时空变化。

模型计算所涉及的冠层参数还包括叶面积指数(LAI)、叶倾角的余弦值( $\beta$ )、叶片和空气阻抗比( $r_c/r_a$ )及树干分数( $h_s/h$ )。由于地面观测难度较大,这些数据主要根据前人<sup>[11,14]</sup>研究赋值。

1.2.2 气象参数 模型计算所需的降水相关参数基于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的国家环境信息中心(NCEI)发布的全球站点逐日气象观测数据集进行提取。利用 Python 语言编写程序,统计研究区内每个站点 2000—2020 年生长季的平均降水深度( $m_h$ , mm)、平均降水次数( $m_v$ , 次)、平均降水间隔时间( $m_{th}$ , d)和平均降水持续时间( $m_{tr}$ , mm)。统计时认为降水量  $> 0$  即为降水 1 d,假设每天降水时长为 6 h,则计算所用的  $m_{th}$  和  $m_{tr}$  由公式(2)和公式(3)转换:

$$m_{tr} = m_{tro} \times \frac{1}{4} \quad (2)$$

$$m_{th} = m_{tho} + m_{tr} \times \frac{3}{4} \quad (3)$$

式中: $m_{tro}$  和  $m_{tho}$  分别为统计的原始值, d。

$$m_h = \underbrace{\bar{h}_0}_I + \underbrace{Mk_v^* \beta_v m_{th} E_{ps}}_{II} + \underbrace{(1-M) \beta_s m_{th} E_{ps}}_{III} + \underbrace{m_h e^{-G-2\sigma^2}}_{IV} + \underbrace{\frac{m_h m_\tau K(1)}{P_\tau} s_0^c}_{V} - \underbrace{\frac{m_h m_\tau K(1)}{P_\tau} \left( 1 + \frac{\frac{3}{2}}{mc-1} \right) \left( \frac{\psi(1)}{Z_w} \right)^{mc} - \frac{\Delta S}{V}}_{VI} \quad (4)$$

模型计算所需的潜在蒸散发数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://www.tpdac.ac.cn/home>)提供的 1 km 分辨率中国逐月潜在蒸散发数据集(1901—2023 年)。空间分辨率为 1 km,时间分辨率为月尺度。

1.2.3 其他参数 模型输入的土壤参数均来自面向陆面过程模型的中国土壤水文数据集<sup>[18]</sup>,该数据集专为中国区域的地表过程建模开发,涵盖关键土壤水文变量,可为生态水文模拟提供高精度的输入数据,适用于中国区域的相关研究。

本研究采用 MODIS 全球土地覆盖产品 MCD12Q1 数据对研究区植被类型进行分类。该数据集空间分辨率为 500 m,时间分辨率为年尺度。基于土地利用类型信息,利用 ArcGIS 对其进行重分类,将研究区划分为林地、灌丛、草地、农田及其他 5 种植被类型,为模型计算提供植被类型分区依据。

## 1.3 研究方法

1.3.1 试验设计思路 围绕干旱半干旱区“气候水分对植被承载力的约束机制与空间分布特征”这一科学问题,本研究设计了以 Eagleson 生态水文模型为核心的研究方案:基于多年平均气候条件,结合气象观测和土壤水文数据,计算研究区最优植被覆盖度,分析气候水分约束下最优植被状态的空间分布特征,同时采用遥感反演的多年平均植被覆盖度对模型结果进行验证,确保模拟的可靠性;最后基于最优与现状植被覆盖度的差异,定量评估不同区域的植被恢复潜力,探讨气候水分对植被增长空间的限制效应。

1.3.2 Eagleson 生态水文模型 Eagleson 提出的生态水文最优性理论基于水量平衡模型,描述了气候、土壤和植被三者之间的相互作用。大气降水在进入陆地后,首先经过地表截留,其中一部分形成地表径流,另一部分下渗进入土壤。当土壤含水量达到田间持水量时,多余水分继续向下渗透,补给地下水储层;反之,当土壤水分含量过低时,地下水通过毛细作用上升,以补充表层土壤水。在降水间隔期,土壤水分通过裸土蒸发与植被蒸腾的方式返回大气,从而形成完整的水分循环体系。植被类型、土壤性质及气候特征均对该过程产生重要影响,并在多年平均时间尺度上表现为稳定的水量平衡关系。其计算公式为:

式中:  $m_h$  为平均降水深度, mm, 为模型输入水分, 即降水; I 为地表截留量; II 为植被蒸腾量; III 为裸土蒸发量; IV 为地表径流量; V 为深层渗透量; VI 为毛细上升量; VII 为土壤蓄水变化量。由于内蒙古高原地下水位较低<sup>[19]</sup>, 坝上高原地下水位较低且近年来呈下降趋势<sup>[20]</sup>, 因此毛细上升量可以忽略不计。  $g$  为土壤水储量变化量, 在多年平均尺度上可以忽略不计;  $\bar{h}_0$  为生长季地表降水截留量的平均值, mm;  $M$  为生长季平均植被覆盖度(无量纲);  $k_v^*$  为植被潜在冠层导度(无量纲);  $\beta_v$  为冠层蒸腾效率(无量纲);  $m_{th}$  为降水的平均间隔时间, d;  $E_{ps}$  为饱和水面潜在蒸发速率, mm/d;  $\beta_s$  为裸土蒸发效率(无量纲);  $G$  为重力渗透参数(无量纲);  $\sigma$  为毛细渗透参量(无量纲);  $m_r$  为生长季长度, d;  $K(1)$  为土壤饱和导水率, cm/d;  $P_r$  为生长季降水总量, mm;  $s_0^r$  为根区平均土壤水分(无量纲);  $m$  为土壤孔隙大小分布指数(无量纲);  $c$  为土壤渗透系数(无量纲);  $\psi(1)$  为土壤饱和基质势, cm;  $Z_w$  为地下水位深度, m;  $\Delta S$  为土壤蓄水变化量。在不同地区, 水量平衡方程的应用可根据实际情况对各组分进行相应简化<sup>[12]</sup>。

植被潜在冠层导度( $k_v^*$ )为实际蒸腾与饱和裸土潜在蒸发的比值, 表示植被的耗水率, 也称为蒸腾效率。

$$k_v^* = \frac{E_v}{E_{ps}} \quad (5)$$

当叶片气孔完全张开时, 植被达到最大蒸腾量, 即  $E_v = E_{pv}$ , 植被潜在冠层导度  $k_v^*$  可以表示为:

表 1 Eagleson 生态水文最优性理论主要输入气象和土壤参数

Table 1 Main input meteorological and soil parameters in Eagleson's ecohydrological optimality theory

参数类型	名称	含义	单位	取值
气象数据	$m_h$	生长季平均降水深度	mm	1.26~5.46
	$m_v$	生长季平均降水次数	次	105.34~125.13
	$m_{th}$	生长季平均降水间隔时间	d	3.13~6.74
	$m_r$	生长季平均降水持续时间	d	0.43~0.57
	$\gamma_0$	地表湿度计常数	Pa/K	0.084~0.237
	$E_{ps}$	饱和水面潜在蒸散发速率	mm/d	2.29~5.49
	$m_r$	生长季平均长度	d	153
土壤数据	$K_s$	土壤饱和导水率	cm/d	5.365~266.543
	$m$	土壤孔隙分布指数	无量纲	0.099~0.393
	$n_c$	土壤孔隙度	无量纲	0.45
	$\psi_s$	土壤饱和基质势	cm	-56.308~-5.503

1.3.3 模型精度评价 为了验证模型模拟的最优植被覆盖度  $M^*$  的合理性, 本研究采用多年平均生长季植被覆盖度  $M$  作为对比基准, 使用 Pearson 相关系数 ( $R$ ) 和均方根误差 (RMSE) 进行精度评价。

$$k_v^* = \frac{E_{pv}}{E_{ps}} = \frac{1 + \frac{\Delta}{\gamma_0}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma_0} + (1-M) \left(\frac{r_c}{r_a}\right)_{M \rightarrow 0} + M \left(\frac{r_c}{r_a}\right)_{M \rightarrow 1}} \quad (6)$$

式中:  $E_v$  为植被蒸腾速率, mm/d;  $E_{ps}$  为饱和水面潜在蒸发速率, mm/d;  $E_{pv}$  为植被潜在蒸腾速率, mm/d;  $E_{ps}$  和  $E_{pv}$  分别由 Penman-Monteith 公式和 Penman 公式计算得出;  $\Delta$  为饱和水汽压-温度曲线的斜率, kPa/°C;  $\gamma_0$  为地表湿度计常数, Pa/K;  $r_c$  和  $r_a$  分别为冠层阻力和空气动力阻力, s/cm;  $\left(\frac{r_c}{r_a}\right)_{M \rightarrow 0}$  为植被冠层覆盖趋近于 0 时的冠层阻力和空气动力阻力之比;  $\left(\frac{r_c}{r_a}\right)_{M \rightarrow 1}$  为植被冠层覆盖趋近于 1 时的冠层阻力和空气动力阻力之比。

根据水量平衡方程, Eagleson 提出了给定物种和环境的最大植被生产力状态, 即临界水分状态。假定在平均降水间隔期, 植物气孔完全打开,  $\beta_v = 1$ , 此时  $M$  与  $k_v^*$  的关系满足公式:

$$Mk_v^* = \frac{V_e}{m_{th}E_{ps}} \quad (7)$$

式中:  $V_e$  为可供植被蒸腾的水分, 在干旱半干旱非季风条件下,  $V_e = m_h$ 。

联立公式(6)和公式(7), 能够得到水分需求曲线和水分供给曲线, 2条曲线的交点即为理论最优植被状态。模型中的参数含义见表1, 不同植被类型冠层参数见表2, 各项参数的详细计算方法与取值参考已有研究<sup>[11,13-14]</sup>。

相关系数计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i^* - \bar{M}^*)(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i^* - \bar{M}^*)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \quad (8)$$

均方根误差计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i^* - M_i)^2} \quad (9)$$

式中： $M_i^*$  和  $M_i$  分别为第  $i$  个像元的最优植被覆盖度和多年平均生长季植被覆盖度； $\bar{M}^*$  和  $\bar{M}$  分别为  $M^*$  和  $M$  的平均值； $n$  为研究区内所有像元的总数。

表 2 Eagleson 生态水文最优性理论主要输入不同植被类型冠层参数

Table 2 Main input canopy parameters of different vegetation types in Eagleson's ecohydrological optimality theory

植被类型	$M=0$		$M=1$		
	$h_s/h$	$r_c/r_a$	$\beta$	$L_i$	$r_c/r_a$
针叶林	0.7	0.3	0.7	3.5	1.8
阔叶林	0.5	0.6	0.3	4.7	0.4
灌丛	0.3	1.5	0.5	3.6	0.5
草地	0	3.0	0.4	2.8	1.2
农田	0.1	2.1	0.5	3.6	0.9

注： $M$  为多年平均生长季植被覆盖度； $h_s/h$  为树干分数； $r_c/r_a$  为叶片和空气阻抗比； $\beta$  为叶倾角的余弦值； $L_i$  为叶面积指数。

1.3.4 植被恢复潜力 模拟的最优植被覆盖度与当前现状植被覆盖度的差值即为植被恢复潜力，计算公式为：

$$\Delta M = M^* - M \quad (10)$$

式中： $\Delta M$  为植被恢复潜力； $M^*$  为模拟的最优植被覆盖度； $M$  为多年平均生长季植被覆盖度。

为定量表征不同区域的植被恢复潜力，依据  $\Delta M$  值划分相应等级，具体分级标准与对应分区见表 3。

表 3 植被恢复潜力分级标准及对应分区

Table 3 Classification criteria for vegetation restoration potential and corresponding zones

分区	分级
超载区	$\Delta M < -0.30$
适宜区	$-0.30 \leq \Delta M < 0$
低恢复潜力区	$0 \leq \Delta M < 0.15$
中恢复潜力区	$0.15 \leq \Delta M < 0.30$
高恢复潜力区	$\Delta M > 0.30$

为保证分级的客观性，分段阈值在参考文献[13]基础上，结合研究区  $\Delta M$  值的分布特征及自然断点法结果综合确定，能够有效反映区域内不同植被恢复潜力的空间差异。分级结果与当前植被覆盖格局具有较好的对应关系，能够较为合理地揭示不同区域的植被恢复状况，具备一定的实际可行性和解释力。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖度空间分布特征

坝上高原与乌兰察布地区多年平均生长季植被覆盖度呈显著的西低东高条带状分布(图 2)。东部

地势较平缓，气候湿润，天然林与人工林分布广泛，覆盖度最高可达 0.87；中部草原地区因地形起伏和水分条件影响，覆盖度约为 0.41；西部阴山及其过渡带地势陡峭、降水稀少，覆盖度普遍偏低，最低不足 0.30，呈典型干旱区特征<sup>[21-23]</sup>。从时间变化来看，2000—2020 年生长季植被覆盖度整体呈上升趋势，2000—2005 年稳步增长，2005—2010 年波动较大，2010 年后提升明显，2019 年达到峰值(图 3)。

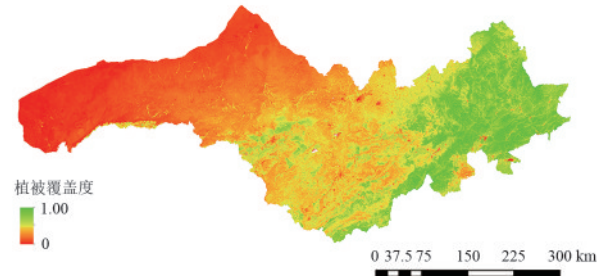


图 2 坝上高原与乌兰察布地区多年平均生长季植被覆盖度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of multi-year average growing season vegetation cover in Bashang Plateau and Ulanqab Region

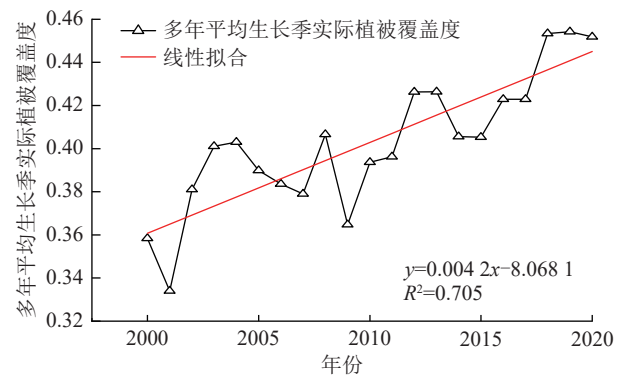


图 3 坝上高原与乌兰察布地区植被覆盖度变化趋势

Fig. 3 Trends in vegetation cover in Bashang Plateau-Ulanqab region

### 2.2 气候特征

坝上高原与乌兰察布地区多年生长季降水特征存在显著空间差异(图 4)，总体呈“东多西少”格局。平均单次降水深度西部最低仅 1.26 mm，东部及中南部最高达 5.46 mm；降水持续时间约为 0.43~0.57 d，空间分布与降水深度基本一致。降水间隔时间则自西向东递减，为 3.13~6.74 d；降水次数为 105.34~125.13 次。西部降水事件频率略高但强度弱、持续时间短，多为短时降水；而东部降水频率稍低但强度与持续时间均较高，表明其降水资源条件更为有利。总体上，降水格局与多年平均植被覆盖度的空间分布趋势一致，体现出水分对植被生长的主导限制作用。

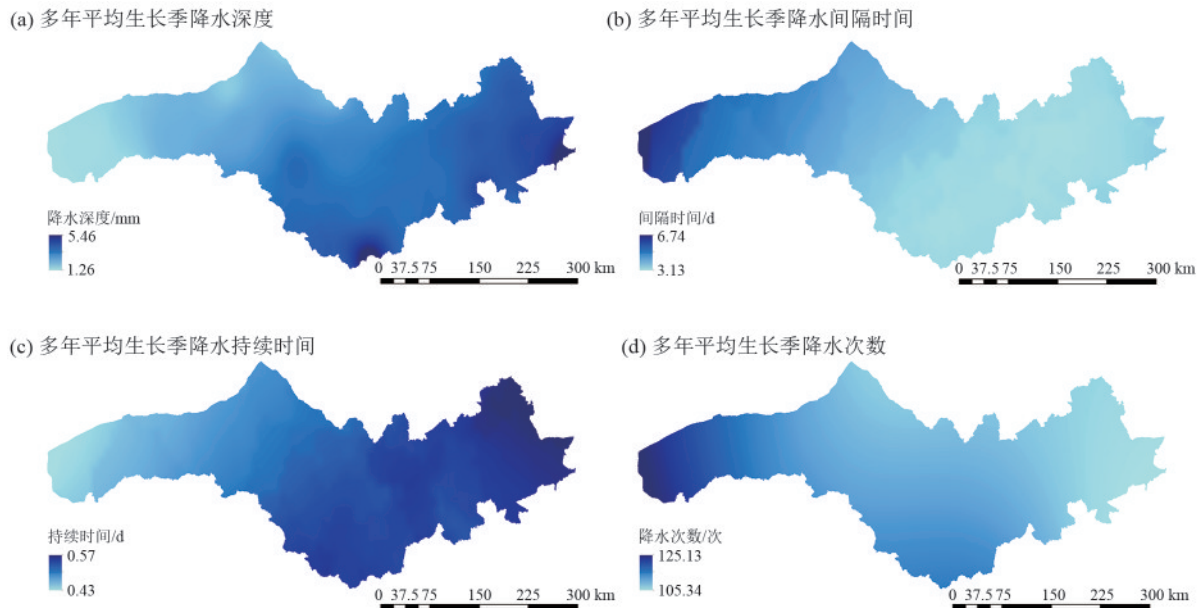


图 4 坝上高原与乌兰察布地区多年平均生长季降水空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of multi-year average growing season precipitation in Bashang Plateau-Ulanqab region

研究区地形复杂,对气温和蒸散发过程影响显著(图5)。高海拔地区如阴山山脉及坝上高原北部气温较低,东南部及低海拔地区因地势和热力效应气温较高。

西部乌拉特后旗受地形阻隔,局部气温偏高。潜在蒸散发分布与气温趋势一致,低海拔地区蒸散发强度较大,而西部和北部因气温偏低、水分输入有限,蒸散发较弱。

(a) 多年平均生长季气温

(b) 多年平均生长季潜在蒸散发

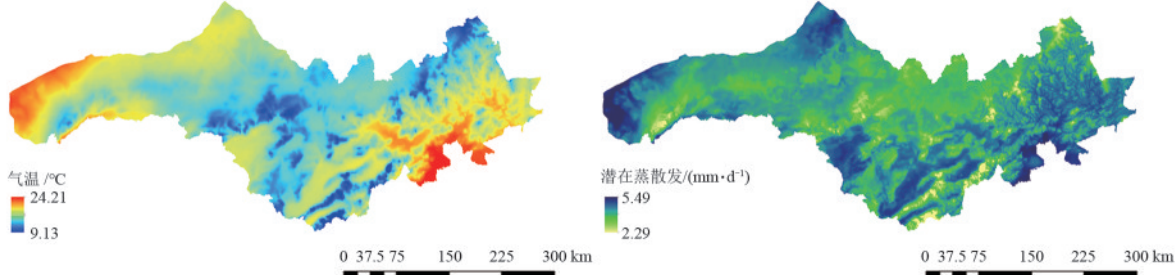


图 5 坝上高原与乌兰察布地区多年平均生长季气温及潜在蒸散发空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi-year average growing season temperature and potential evapotranspiration in Bashang Plateau-Ulanqab region

### 2.3 模拟的最优植被覆盖度

2.3.1 模型精度验证 本研究采用最小二乘回归分析法评估模拟的最优植被覆盖度  $M^*$  与多年平均生长季植被覆盖度  $M$  之间的拟合程度,将二者逐像元绘制在  $x-y$  坐标系中,结果显示散点大部分落在  $y=x$  两侧(图6)。通过回归分析进一步计算相关性指标,得到相关系数  $R=0.747$ ,均方根误差  $RMSE=0.1189$ ,表明 Eagleson 生态水文模型在坝上高原与乌兰察布地区具有良好的适用性。

2.3.2 模拟的最优植被覆盖度 研究区多年平均生长季植被覆盖度为 0.45,模拟的最优植被覆盖度为 0.39,结合 2020 年土地利用数据,将其重分类为林地、灌丛、草地、农田和其他 5 类,其中林地最优植被覆盖度为 0.39,草地最优植被覆盖度为 0.44,灌丛最优植被覆盖度为 0.42。

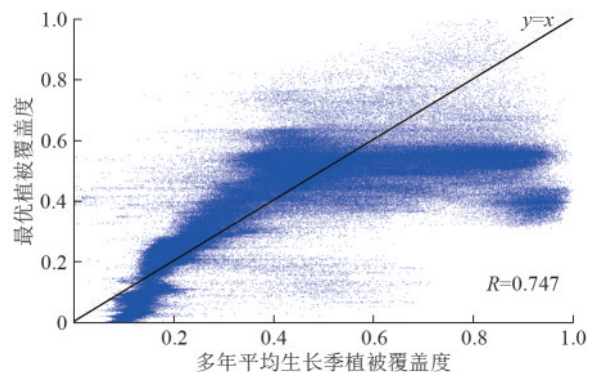


图 6 多年平均生长季植被覆盖度 ( $M$ ) 与模拟的最优植被覆盖度 ( $M^*$ ) 回归分析

Fig. 6 Regression analysis of multi-year average growing season vegetation cover ( $M$ ) and simulated optimal vegetation cover ( $M^*$ )

研究区最优植被覆盖度的空间分布与降水量呈明显的梯度变化关系(图7),整体表现为降水量越

高,植被盖度越大,但在高降水区域此趋势趋于平缓甚至略有下降。在生长季降水量 200~400 mm 的区域,实际植被盖度  $M$  与最优植被盖度  $M^*$  整体趋势较为一致,表明该区域水热条件基本能够支持植被生长。从空间分布来看,该区域主要位于研究区的中部过渡地带,包括坝上高原东部和燕山山前丘陵区。其中,在生长季降水量 200~300 mm 的区域,  $M(0.3593)$  略低于  $M^*(0.4273)$ , 说明该区域的植被生长仍受到一定的水分限制,但在生长季降水量 300~400 mm 的区域,二者基本接近 ( $M=0.5644$ ,  $M^*=0.5417$ ), 表明该区域的自然植被生长已较好地适应了降水梯度,水分供应基本满足植被需求;在东部高降水区域 ( $>400$  mm), 特别是燕山山脉、太行山东麓及京津冀周边地区,实际植被盖度显著高于最优值,其中生长季降水量 400~500 mm 的区域,  $M(0.7104)$  远超  $M^*(0.4974)$ 。此外,在生长季降水量 500~600 mm 的区域,  $M$  仍高于最优值 ( $M=0.5833$ ,  $M^*=0.5122$ ), 实际植被盖度已超过降水主导下的模拟最优值。

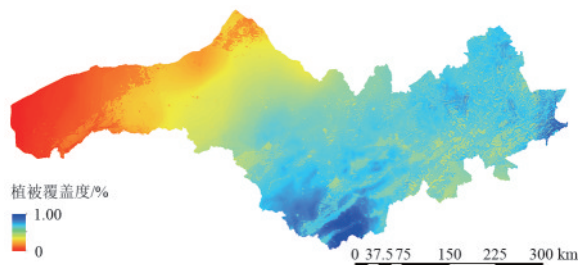


图 7 最优植被覆盖度空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of optimal vegetation cover

## 2.4 植被恢复潜力

坝上高原和乌兰察布地区的植被恢复潜力在空间上呈现明显的区域差异(图 8),整体上以适宜区 ( $-0.3 \leq \Delta M < 0$ ) 和低恢复潜力区 ( $0 \leq \Delta M < 0.15$ ) 为主,分别占 44.90% 和 40.23%,表明研究区大部分区域的植被盖度接近最优水平,生态状态较为稳定。中等恢复潜力区 ( $0.15 \leq \Delta M < 0.30$ ) 和高恢复潜力区 ( $\Delta M > 0.30$ ) 主要分布在研究区东南部及局部低植被覆盖区域,占比分别为 4.81% 和 0.28%,这些区域的实际植被盖度明显低于最优值,植被恢复潜力较高。超载区 ( $\Delta M < -0.30$ ) 主要分布于局部高覆盖区域,占比 9.77%,表明部分区域的植被盖度可能超出生态适宜水平。从土地利用类型来看,草地中有 59.33% 的区域具有植被恢复潜力(即  $\Delta M \geq 0$ ),最大值可达 0.58,表明该区域的实际植被盖度低于最优植被盖度,存在一定的植被提升空间。其中,低恢复潜力区 ( $0 \leq \Delta M < 0.15$ ) 占据最大比例(52.75%),说明大部分草地的植被盖度虽略低于最优值,但生态状

况仍然较为接近平衡状态。而中等恢复潜力区 ( $0.15 \leq \Delta M < 0.30$ ) 和高恢复潜力区 ( $\Delta M > 0.30$ ) 分别占 6.27% 和 0.31%,这部分区域的植被盖度明显偏低;相比之下,林地和灌丛平均植被恢复潜力小于 0,灌丛植被恢复潜力最大值为 0.08,林地植被恢复潜力最大值仅 -0.04,表明其实际植被盖度普遍高于最优植被盖度,整体生态状态较为稳定,甚至在部分区域可能存在植被密度过高的情况。

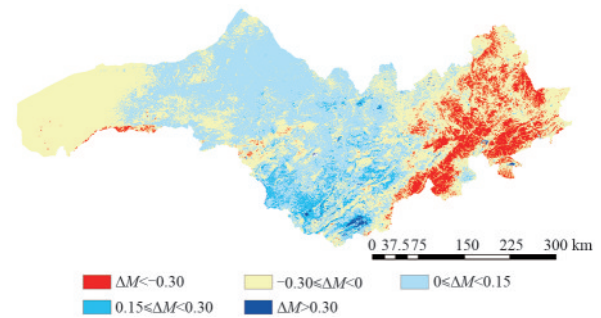


图 8 坝上高原和乌兰察布地区植被恢复潜力空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of vegetation restoration potential in Bashang Plateau-Ulanqab region

## 3 讨论

本研究基于 Eagleson 生态水文模型,模拟坝上高原与乌兰察布地区最优植被覆盖度,并将模拟结果与 2000—2020 年该地区多年平均生长季实际植被覆盖度进行对比分析。结果表明,模拟值与实际值在空间分布上高度一致,均呈东高西低的条带状分布,反映区域降水梯度对植被覆盖的主要调控作用。通过最小二乘法拟合分析,得到二者的相关系数  $R=0.747$ ,均方根误差  $RMSE=0.1189$ ,说明该模型在研究区具有较好的适用性,能够反映水分对植被覆盖的生态控制机制。

坝上高原与乌兰察布地区植被分布受降水与蒸散发的共同调控。降水控制水分输入,蒸散发调节水分输出,二者共同作用决定可用于植被生长的有效水量。研究区西部水热条件严酷,降水稀少、蒸发强烈,水分亏缺显著<sup>[24]</sup>,导致植物生长受限,植被覆盖度普遍较低;东部降水相对丰沛,蒸发强度较弱<sup>[25]</sup>,有利于维持较高的植被覆盖水平,特别是在林地和高原草甸分布区表现明显。此现象可能与林地和灌丛自身的生态特征有关,该类型的植被具有较强的自我恢复能力,特别是在降水条件较好的区域,植被生长较为旺盛。然而,植被盖度高于最优值并不意味着生态状况完全良好。在水资源有限的半干旱或干旱区,过高的植被密度可能导致土壤水分亏缺<sup>[26]</sup>,影响生态系统的长期稳定性。总而言之,随着降水自西向东增加,林、灌、草 3 种植被类型的最优植被覆盖度随之上升,说明水分在不同生态系统

中具有一致的限制效应;另一方面,气温对蒸散发强度的调节作用亦不可忽视。在东南部地势低、气温高的地区,即使降水丰富,但由于地表蒸发迅速,实际可利用水分减少,可能抑制植被的生长。而在中北部高海拔、低温区域,蒸发压力较小,有限的降水仍可维持植被结构。

不同降水梯度下,模型模拟结果存在差异。模型在中部过渡带(年降水量200~400 mm)的模拟效果最优,实测值与模拟值高度接近,误差较小。表明该区域受人为干扰相对较弱,植被生长主要受水分限制;相比之下,在东部较湿润区(年降水量>400 mm),实际植被覆盖度普遍高于模拟最优值,主要由于模型输入数据的局限,仅考虑自然气候条件下植被生长状态<sup>[13]</sup>,未能考虑生态恢复工程等人为措施对植被覆盖的影响,事实上由于人类活动影响该地区植被已经超过自然条件下的承载水平;而在西部较干旱地区(年降水量<200 mm),降水严重匮乏,水分成为限制植被生长的主导因子,实际和模拟的植被覆盖度都处于较低水平,二者之间的差异相对较小。

导致上述偏差的原因可以归结为两类:首先是人类活动的干扰,东部地区生态恢复工程大规模实施,在很大程度上提升了区域植被覆盖度<sup>[27]</sup>,但也使得植被水分消耗超出了自然供给能力,导致实际值高于模拟值;与此同时,草地退化、过度放牧等人类活动可能抑制了中部典型草原植被覆盖达到自然条件下的最优水平,使得实际盖度偏低,存在植被恢复空间。其次是模型简化假设与计算过程所带来的不确定性,Eagleson生态水文最优性理论以多年尺度的水量平衡为基础,未考虑年际降水波动、极端干旱或暴雨等非稳定过程,可能造成水分估算偏差。此外,遥感估算误差、土地利用分类时间异质性等因素也有可能影响模型结果的精度。

本研究的植被恢复潜力分区结果与国内相似区域的研究成果具有一定一致性。申子等<sup>[14]</sup>基于河西内陆河流域研究发现,流域内 $\Delta M$ 平均值为0.003,恢复潜力主要集中于北部区域;范德政<sup>[11]</sup>在宁夏地区模拟的最优植被覆盖度与现状均值差异小于0.05,亦表现出南高北低的格局。综合来看,不同生态区划的植被恢复潜力受降水梯度、土壤水分条件共同影响,分布格局具有一定共性,但由于区域气候梯度、地形起伏及土地利用方式的不同,差异性亦不容忽视。

本研究首次在坝上高原与乌兰察布地区这一横

跨干旱-半干旱-半湿润过渡区的大尺度背景下,基于Eagleson生态水文最优性理论,系统模拟不同气候水分条件下的最优植被覆盖格局,在区域尺度的植被承载力定量分析中具有较强的可推广性。弥补传统植被时空变化研究中“描述现状而缺乏潜力评估”的不足,为揭示气候水分条件下植被可能达到的恢复上限提供理论支撑;另一方面,通过 $\Delta M$ 指标反映现状植被与水文气候耦合的偏离程度,为干旱半干旱区生态水文调控提供量化依据。

同时,本研究通过最优与现状植被覆盖度差异的空间分析,可为京津风沙源区的分区治理提供“以水定绿、适度恢复”的目标判定标准;针对中部草地退化区,可利用模型识别的恢复潜力区作为重点治理单元,优化草地补播、围封禁牧等措施,提升水分利用效率与生态恢复成效;在超载区,通过调整群落结构等策略,减轻区域水分亏缺压力,助力实现“三北”工程等生态工程的可持续性目标。总体上为半干旱区有限水资源约束下的植被格局优化提供理论支撑与技术参考,为区域生态安全格局稳定与水资源高效利用提供决策支持。

## 4 结论

1) 坝上高原与乌兰察布地区模拟的最优植被覆盖度在空间分布上呈现东高西低的条带状分布,与多年实际观测的生长季平均植被覆盖度空间分布规律基本保持一致,研究区多年平均生长季植被覆盖度为0.45,模拟的最优植被覆盖度为0.39。

2) 从植被恢复潜力空间分布来看,适宜区( $-0.30 \leq \Delta M < 0$ )与低恢复潜力区( $0 \leq \Delta M < 0.15$ )占比分别为44.90%和40.23%,表明研究区植被稳定性较好,超载区占比仅9.77%,主要集中于河北省承德市、北京市门头沟区、昌平区和房山区。

3) 从不同土地利用类型来看,林地模拟的最优植被覆盖度为0.09~0.77,灌丛模拟的最优植被覆盖度为0.08~0.83,草地最优植被覆盖度为0.06~0.94,空间分布上由南向北、由东向西逐渐减少。

### 参考文献:

- [1] 陈鹏,张冰,马荣,等.基于健康与恢复力的生态系统退化风险研究:以坝上高原察汗淖尔流域为例[J].中国地质,2024,51(3):1034-1045.  
CHEN P, ZHANG B, MA R, et al. Ecosystem degradation risk based on health and resilience: A case study of Chahannur Lake basin on Bashang Plateau[J].Geology in China,2024,51(3):1034-1045.

- [2] 张益,王渝淞,武昱鑫,等.坝上地区人工林和草地生长季土壤水势动态[J].水土保持学报,2023,37(3):181-189.  
ZHANG Y, WANG Y S, WU Y X, et al. Dynamics of soil water potential in growing season of plantation and grassland in Bashang area[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(3):181-189.
- [3] 朱教君,郑晓.关于三北防护林体系建设的思考与展望:基于40年建设综合评估结果[J].生态学杂志,2019,38(5):1600-1610.  
ZHU J J, ZHENG X. The prospects of development of the three-north afforestation program (TNAP): On the basis of the results of the 40-year construction general assessment of the TNAP[J].Chinese Journal of Ecology, 2019,38(5):1600-1610.
- [4] 郭伟,张鸾,刘爽,等.晋北风沙区人工林土壤水分及粒度特征[J].中国水土保持科学,2018,16(2):80-87.  
GUO W, ZHANG L, LIU S, et al. Characteristics of soil moisture and grain size in different plantation types in windy and sandy area of north Shanxi[J].Science of Soil and Water Conservation,2018,16(2):80-87.
- [5] 吴东旭.三北防护林退化现状及更新修复对策[J].防护林科技,2020(9):64-65.  
WU D X. Status and regeneration countermeasures of degraded stands of the three north shelterbelt[J].Protection Forest Science and Technology,2020(9):64-65.
- [6] 郭建光,宋向阳,席彦飞,等.三北防护林退化现状及成因分析:以乌拉特中旗为例[J].内蒙古林业调查设计,2024,47(2):67-71.  
GUO J G, SONG X Y, XI Y F, et al. Current status and causes of degradation of the three-north shelter forest: A case study of Urad middle banner[J].Inner Mongolia Forestry Investigation and Design,2024,47(2):67-71.
- [7] 姜凤岐,于占源,曾德慧,等.气候变化对三北防护林的影响与应对策略[J].生态学杂志,2009,28(9):1702-1705.  
JIANG F Q, YU Z Y, ZENG D H, et al. Effects of climate change on the Three-north Shelter Forest Program and corresponding strategies[J].Chinese Journal of Ecology,2009,28(9):1702-1705.
- [8] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.  
GUO Z S, SHAO M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau[J].Acta Ecologica Sinica,2003,23(8):1640-1647.
- [9] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J].生态学报,2013,33(21):6747-6761.  
OUYANG Z Y, ZHU C Q, YANG G B, et al. Gross ecosystem product: Concept, accounting framework and case study [J].Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (21) : 6747-6761.
- [10] 李新荣,张志山,谭会娟,等.我国北方风沙危害区生态重建与恢复:腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):257-266.  
LI X R, ZHANG Z S, TAN H J, et al. Ecological reconstruction and restoration in the wind-blown sand hazard area in northern China: Discussion on soil moisture and vegetation carrying capacity in Tengger Desert [J].Scientia Sinica (Vita),2014,44(3):257-266.
- [11] 范德政,梅雪梅,李鹏,等.生态水文平衡状态下宁夏地区植被承载力模拟[J].水土保持学报,2023,37(4):166-172.  
FAN D Z, MEI X M, LI P, et al. Simulation of vegetation carrying capacity in Ningxia under eco-hydrological balance[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(4):166-172.
- [12] EAGLESON, PETER S. Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function [M]. Cambridge: Cambridge University Press,2004.
- [13] 李沁书.中国东北样带生态水文最优性研究[D].北京:清华大学,2016.  
LI Q S. Study on eco-hydrological optimality of northeast China transect[D].Beijing: Tsinghua University,2016.
- [14] 申子傲,吴静,李纯斌.基于生态水文最优性理论的河西内陆河流域植被覆盖模拟[J].草业学报,2024,33(9):15-27.  
SHEN Z A, WU J, LI C B. Simulation of vegetation cover in the inland river basin of Hexi based on the theory of ecohydrological optimality [J]. Acta Prataculturae Sinica,2024,33(9):15-27.
- [15] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.  
LIU B Y, GUO S Y, LI Z G, et al. Sampling survey of hydraulic erosion in China[J].Soil and Water Conservation in China,2013(10):26-34.
- [16] 武爱彬,赵艳霞.坝上高原生态用地时空格局演变与生态系统服务价值分析[J].农业工程学报,2017,33(2):283-290.  
WU A B, ZHAO Y X. Analysis of ecological land pattern evolution and ecosystem service value in Bashang Plateau[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(2):283-290.
- [17] 方梓行,何春阳,刘志锋,等.中国北方农牧交错带气候变化特点及未来趋势:基于观测和模拟资料的综合分析[J].自然资源学报,2020,35(2):358-370.  
FANG Z H, HE C Y, LIU Z F, et al. Climate change

- and future trends in the agro-pastoral transitional zone in northern China: The comprehensive analysis with the historical observation and the model simulation [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 358-370.
- [18] DAI Y J, SHANGGUAN W, DUAN Q Y, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 14(3): 869-887.
- [19] 孙家枢, 王永军. 内蒙古自治区地下水资源分布规律 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2011(17): 45-47.  
SUN J S, WANG Y J. Distribution law of groundwater resources in Inner Mongolia autonomous region [J]. *Inner Mongolia Science Technology and Economy*, 2011(17): 45-47.
- [20] 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 等. 京津冀西北典型区域地下水水位时空演变及驱动因素 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1301-1313.  
ZHAO Y F, LUO Z X, YU Y J, et al. Spatio-temporal changes of groundwater level and its driving factors in a typical region of Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1301-1313.
- [21] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 近40年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异 [J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 9108-9119.  
LIU Y L, XIN Z B, LI Z S, et al. Climate effect on the radial growth of *Populus simonii* in northwest of Hebei for last four decades [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 9108-9119.
- [22] 李红瑛, 薛羽, 曹二佳, 等. 近50年来乌兰察布市水分盈亏量时空变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(12): 145-151.  
LI H Y, XUE Y, CAO E J, et al. Spatiotemporal variation characteristics of water deficit in Ulanqab during the latest 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 145-151.
- [23] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(3): 1158-1167.  
YIN D D, WANG Y H. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1158-1167.
- [24] 张煦庭, 潘学标, 徐琳, 等. 基于降水蒸发指数的1960—2015年内蒙古干旱时空特征 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 190-199.  
ZHANG X T, PAN X B, XU L, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960—2015 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 190-199.
- [25] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水水资源变化特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 99-110.  
GAO J Q, YANG X G, DONG C Y, et al. Precipitation resource changed characteristics in arid and humid regions in northern China with climate changes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 99-110.
- [26] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 等. 近25年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析 [J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 589-598.  
HUANG S W, LI X S, WU B F, et al. The distribution and drivers of land degradation in the three-north shelter forest region of China during 1982—2006 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 589-598.
- [27] 谢舒笛, 莫兴国, 胡实, 等. 三北防护林工程区植被绿度对温度和降水的响应 [J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 152-165.  
XIE S D, MO X G, HU S, et al. Responses of vegetation greenness to temperature and precipitation in the Three-North Shelter Forest Program [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(1): 152-165.