毛乌素沙地水源涵养功能时空分异及其驱动因素

丁旭东[1], 常文静[1], 王盈盈[1], 余海龙[1], 黄菊莹[2]
(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021; 2.宁夏大学 生态环境学院, 宁夏 银川 750021)

摘　要: [目的]探究毛乌素沙地水源涵养功能时空分异规律及其驱动机制,为该区生态修复工程实施效果评估,水资源动态调配和土地利用规划决策工作提供科学参考。[方法]基于毛乌素沙地2000—2024年土地利用、土壤属性、地形、土壤饱和导水率等多源数据,运用InVEST模型产水量模块及水源涵养修正公式,揭示2000—2024年水源涵养功能的年际动态变化及空间分异特征,并结合地理探测器解析各类影响因子的解释力。[结果]①毛乌素沙地水源涵养功能空间分布呈现显著的西北低,东南部高的空间异质性特征。②2000—2024年毛乌素沙地水源涵养深度以0.685 mm/a的速率呈不显著增长趋势,且存在明显的时段差异和区域差异。③单因子分析结果表明,降水量、土壤、地貌和土地利用类型是主导水源涵养年际变化和空间分异的解释力最强的因子。双因子交互作用分析结果表明,降水量与土地利用类型的组合具有最强的解释力。[结论]毛乌素沙地水源涵养功能的显著提升是以生态修复工程为代表的土地利用和气候变化多因子协同作用的结果,且土地利用和气候变化对区域水源涵养功能的作用机制存在显著差异,未来需要持续关注并优化多因子交互关系以进一步提升水源涵养功能。

关键词: InVEST模型; 水源涵养; 地理探测器; 毛乌素沙地
文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)03-0137-12　　**中图分类号:** S152.7+1, X171.1

文献参数: 丁旭东, 常文静, 王盈盈, 等.毛乌素沙地水源涵养功能时空分异及其驱动因素[J].水土保持通报,2026,46(3):137-148. Ding Xudong, Chang Wenjing, Wang Yingying, et al. Spatiotemporal variation and its driving factors of water conservation function in Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):137-148.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.005　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.005**

Spatiotemporal variation and its driving factors of water conservation function in Mu Us sandy land

Ding Xudong[1], Chang Wenjing[1], Wang Yingying[1], Yu Hailong[1], Huang Juying[2]
(1.*School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*; 2.*School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal patterns and driving mechanisms of the water conservation function in Mu Us sandy land were investigated in order to provide a scientific reference for evaluating the effectiveness of ecological restoration projects, dynamic allocation of water resources, and land use planning decisions. [Methods] Based on multi-source data for Mu Us sandy land from 2000 to 2024, including land use, soil properties, topography and saturated hydraulic conductivity, this study employed the water yield module of the InVEST model and a water conservation adjustment formula to reveal the interannual dynamics and spatial differentiation characteristics of water conservation during this period. Additionally, the geodetector was used to analyze the explanatory power of different influencing factors. [Results] ① The spatial distribution of water conservation in Mu Us sandy land exhibited significant spatial heterogeneity, characterized by lower values in the northwest and higher values in the southeast. ② During the study period, the water conservation depth in Mu Us sandy land showed a non-significant increasing trend at a rate of 0.685 mm/a, but with notable temporal and regional

收稿日期:2025-10-18　　**修回日期:**2025-12-10　　**采用日期:**2025-12-12
资助项目:国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目"宁夏中部干旱带典型固沙植物高效抚育利用的水力调控机理"(U23A20223);国家自然科学基金"白刺灌丛沙堆演化过程中冠层结构和根系构型对土壤水分变化的响应与适应"(42561011)
第一作者:丁旭东(1999—),男(汉族),甘肃省白银市人,硕士研究生,研究方向为自然地理学。Email:dingxudong0318@163.com。
通信作者:余海龙(1979—),男(汉族),甘肃省酒泉市人,博士,教授,主要从事土壤地理及节水灌溉等方面的研究。Email:yhl@nxu.edu.cn。

differences. ③ Results of single-factor analysis indicated that precipitation, soil properties, topography and land use type were the factors with the strongest explanatory power for the interannual variation and spatial differentiation of water conservation. The results of two-factor interaction analysis revealed that the combination of precipitation and land use type had the strongest explanatory power. [Conclusion] The significant improvement in the water conservation function of Mu Us sandy land is the result of the synergistic effects of multiple factors, including land use represented by ecological restoration projects and climate change. Moreover, the mechanisms by which land use and climate change influence the regional water conservation function exhibit significant differences. Future research should continuously focus on and optimize the interactions among multiple factors to further enhance the water conservation function.

Keywords: InVEST model; water conservation; geodetector; Mu Us sandy land

毛乌素沙地地处中国北方农牧交错带,既是京津冀主要沙尘源地[1],也是黄河几字湾风沙防治“攻坚战”主战场[2],北方生态安全屏障重点建设区域[3]。因其与蒙、陕、宁能源金三角在区位上存在重合,受矿产开发[4]、药材(甘草)采集、过度放牧等人类活动影响,区域荒漠化问题加重。2000年前后一系列生态工程如“三北”防护林工程、退耕还林还草工程和山水林田湖草沙综合治理工程的实施对毛乌素沙地生态系统的组成、结构等产生了重要影响,促使旱区植被盖度增加和生态系统功能的提升[5]。空间上表现出绿洲范围的扩张和荒漠化面积的缩减。土地利用变化是生态系统服务功能转变的关键驱动因素[6],它可以影响生态系统的性质、过程和组成。生态系统水源涵养功能是干旱区绿洲-荒漠复合系统存在的基础[7]。绿洲化和荒漠化的相互博弈不仅使毛乌素沙地土地利用发生变化,且使生态系统的结构和功能也发生相应变化。如土地利用变化、土壤、地形、气候等因素造成的生态系统的变化可能对水文通量(如径流或蒸散)或单个的水资源储量组分(如土壤水分)有显著影响,但其对水资源量的净影响仍不清楚[8]。厘清毛乌素沙地绿洲化和荒漠化博弈过程中水源涵养功能的时空变化对动态追踪区域生态系统服务功能过程、明确产水变化对人类福祉产生何种影响具有重要价值。

水源涵养是生态系统在一定的时空范围和条件下,将水分保持在系统内的过程和能力[9]。参照生态学视角的蓄水法[10]计算公式可知,植被是水源涵养功能的主体,其组分主要由冠层、枯枝落叶层和根区的蓄水能力构成[11]。左其亭等[12]总结了水源涵养功能估算的8种方法,包括林冠截留剩余量法、水量平衡法、降水储存量法、土壤蓄水量法、综合蓄水能力法、地下径流增长法、年径流量法、多因子回归法等。其中,水量平衡法以生态系统的“水量收支平衡”为理论基础,计算相对简便且准确度高[13],应用更为广泛。随着计算机科学的不断进步,目前,国外学者[13]通过引入模型以实现水源涵养功能的估算,常见模型包括水文评估模型(SWAT)、水文生态模型(InVEST)和生态系统评价模型(GUMBO)等。同时,国内学者[13-15]通过对模型参数的本地化实现了对不同尺度、不同生态系统类型[16-21]的水源涵养量时空分布与动态特征的分析,并取得较好的评估效果。其中,基于水量平衡法的InVEST模型具有多尺度、动态性、准确性高、可视化等优点[22],是当前水源涵养功能估算方面最常用的方法。

优化和提升干旱、半干旱区生态系统水源涵养功能不仅有助于保持系统稳定性,还可基于土地利用变化引起的产水量转移特征[13]分析确定植树造林规模和区位,并指导后续生态修复工程的实施。2000年前后毛乌素沙地实施了一系列生态工程,经统计,2002—2017年毛乌素沙地造林总面积约1.87×10^4 km^2,占沙地总面积的20.52%[22],沙地面积显著减少、林地面积显著增加,使其景观格局和生态过程均发生显著变化。土地利用变化是生态系统功能变化最关键、最直接的驱动力之一。鉴于不同土地利用类型的水源涵养能力不同,探究毛乌素沙地绿洲化和荒漠化博弈过程中水源涵养功能的时空变化,可为林草植被结构优化调控和生态修复决策提供理论依据。因此,本研究以毛乌素沙地为研究区,将产水量和水源涵养量作为反映水源涵养功能的指标,以2000—2024年气象、土壤、土地利用等数据为数据源,基于InVEST模型产水模块对毛乌素沙地2000,2005,2010,2015和2024年的水源涵养进行定量评价。在分析不同土地利用变化引起的水源涵养功能的时空分异基础上,并基于地理探测器模型定量研究10个自然因素对毛乌素沙地水源涵养功能的单独影响及交互作用,旨在探究生态工程对水源涵养功能的影响并为后期工程分区施策治理提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

鉴于目前对包括毛乌素沙地边界的确定还存在分歧。本研究以在学术界有较大影响力和认可度的国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/)发布的《中国1:10万沙漠(沙地)分布数据集》为基础来确定毛乌素沙地所在的行政区划,并以此行政边界为界限研究毛乌素沙地。毛乌素沙地是中国四大沙地之一,地处中国北方农牧交错带的中部,是黄土高原与鄂尔多斯台地的过渡地带,其生态环境脆弱、对气候变化敏感,是中国北方重要的生态屏障区。毛乌素沙地植被呈现出荒漠草原-草原-森林草原的过渡分布[14],具有明显的生态脆弱性和空间异质性[15],主要生态问题为土壤侵蚀。研究区气候类型为典型的大陆性季风气候[16],雨热同期,降水空间分布严重不均。多年平均温度在5.6～10.2 ℃,多年平均降水量在154～450 mm,降水量分配不均,多年平均降水量由东南部向西北递减[17]。参照《1:100万中国植被图集》可将当地植被类型分为9类(图1),分别为栽培植被、阔叶林、灌丛、沙漠、荒漠草原、草丛、草甸、沼泽和其他。其中,毛乌素沙地南部和东南部地貌以黄土丘陵地形为主,气候条件复杂多样,植被以阔叶林为主[18],植被生长状况明显优于毛乌素沙地其他区域;中部和东部属于干草原,北部边缘属于荒漠草原,分布着灌丛和栽培植被,降水稀少严重影响着区域植被的生长状况[19]。

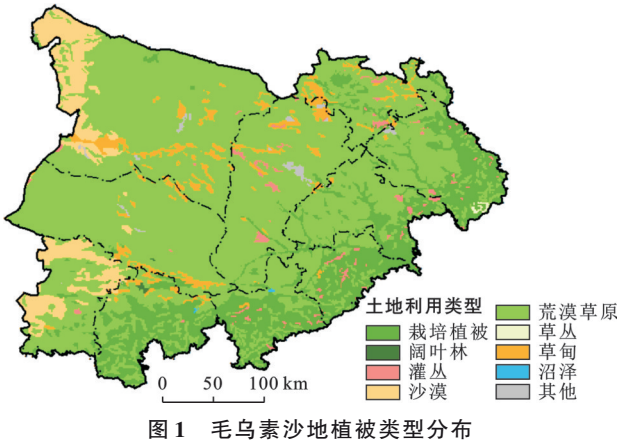

图1　毛乌素沙地植被类型分布

Fig.1　Distribution of vegetation types in Mu Us sandy land

1.2　数据来源

使用InVEST模型估算研究区水源涵养功能,该模型根据水循环原理,结合年降水量、年潜在蒸散量、植物根系限制层深度、PAWC、土地利用以及水文水资源数据,计算研究区产水量。其中,气象数据主要用于驱动InVEST模型并进行产水量分析。为避免单年数据的低代表性,本研究选取5个时段2000,2005,2010,2015和2024年(分别为1998—2002年、2003—2007年、2008—2012年、2013—2017年和2018—2024年)年降水量和年潜在蒸发量的平均值输入模型。本文使用的年降水量数据和潜在蒸散发数据来源于"国家冰川冻土沙漠科学数据中心/国家特殊环境、特殊功能观测研究台站共享服务平台"(http://www.ncdc.ac.cn)的多源数据融合的中国高分辨多要素气象驱动产品,数据分辨率为1 km,时间序列为1998—2024年;根系限制层深度所使用的数据为Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters,分辨率为100 m;土壤属性数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心的基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1),利用土壤质地计算植物可利用水(PAWC)和土壤饱和导水率;高程数据来源于中国科学院地理空间数据云(http://www.gscloud.cn),为SRTM 90 m分辨率栅格数据;水文水资源数据主要来源于毛乌素沙地涉及的内蒙古、陕西、宁夏境内主要城市的水资源公报,用于InVEST模型中产水模块的参数率定;土地利用(LULC)数据采用Landsat解译的土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心。在模型运算中,由于InVEST模型输出的数据分辨率与土地利用数据的分辨率一致,因此不需对数据进行重采样。

1.3　研究方法

1.3.1　水源涵养量估算模型

InVEST水源涵养模型包括两部分,分别为产水量的计算和基于产水量的水源涵养量计算。其中,产水量的计算本研究采用InVEST-AWY(annual water yield)模块估算2000—2024年毛乌素沙地网格尺度的产水量空间分布。该模型不仅能快速、便捷地量化水源涵养功能,还能以可视化的形式表达水源涵养服务的空间分异特征。InVEST-AWY模块根据水循环原理,通过降水量、植被蒸腾、地表蒸散发、根系深度、土壤厚度和植被可利用水量等估算产水量。具体计算公式为

$$Y(x)=\left[1-\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)}\right]\cdot P(x) \tag{1}$$

式中:$Y(x)$代表栅格x的产水量(mm);$\mathrm{AET}(x)$是像素年尺度的实际蒸散(mm);$P(x)$为像素年降水量(mm);$\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)}$为水量平衡的蒸散部分,采用Budyko假设计算:

$$\frac{\mathrm{AET}(x)}{P(x)}=1+\frac{\mathrm{PET}(x)}{P(x)}-\left\{1+\left[\frac{\mathrm{PET}(x)}{P(x)}\right]^{\omega}\right\}^{1/\omega} \quad (2)$$

式中：PET(x)为潜在蒸散量；AET(x)为实际蒸散；ω为表示土壤性质的经验参数。

$$\mathrm{PET}(x)=K_c(x)\times \mathrm{ET}_o(x) \quad (3)$$

式中：$\mathrm{ET}_0(x)$为参考植被蒸散量；$K_c(x)$为作物蒸散系数。

$$w(x)=\frac{\mathrm{AWC}(x)\times Z}{P(x)} \quad (4)$$

式中：$w(x)$为表征自然条件下流域气候-土壤属性特征的非物理经验拟合参数，无量纲；AWC(x)为植物有效含水量；Z为季节常数，根据内蒙古、陕西和宁夏地区的水资源公报中的产水系数进行修正后获得。

$$\mathrm{AWC}(x)=\min(\mathrm{rest_layer_depth},\ \mathrm{root_depth})\times \mathrm{PAWC} \quad (5)$$

式中：rest_layer_depth为植被根系限制土层深度；root_depth为植被根系深度。

$$\begin{aligned}\mathrm{PAWC}=&(54.509-0.132\times S_{\mathrm{AN}}-0.003\times S_{\mathrm{AN}}{}^2-0.055\times S_{\mathrm{IL}}-0.006\times\\ &S_{\mathrm{IL}}{}^2-0.738\times C_{\mathrm{LA}}+0.007\times C_{\mathrm{LA}}{}^2-2.638\times C+0.501\times C^2)\end{aligned} \quad (6)$$

式中：PAWC为植被可利用水量(mm)；S_{AN}，S_{IL}，C_{LA}，C分别为土壤中砂粒(%)、粉粒(%)、黏粒(%)以及有机碳含量(%)。

1.3.2 水源涵养计算模型

基于产水量结果，利用地形指数、土壤饱和导水率和流速系数对其修正得到水源涵养深度(单位面积水源涵养量，mm)[24]。

$$\mathrm{WR}=\min\left(1,\frac{249}{\mathrm{Velocity}}\right)\times\min\left(1,\frac{0.9\times \mathrm{TI}}{3}\right)\min\left(1,\frac{K_{\mathrm{sat}}}{300}\right)\times Y \quad (7)$$

式中：WR为栅格单元的水源涵养深度(mm)；Velocity为流速系数(无量纲)；TI为地形指数(无量纲)；K_{sat}为土壤饱和导水率(cm/d)；Y为InVEST模型计算获得的产水量(mm)。其中，流速系数根据植被类型查阅参考文献获得(表1)。地形指数通过高程计算得到，计算公式为

$$\mathrm{TI}=\lg\left(\frac{\mathrm{Drainage}_{\mathrm{Area}}}{\mathrm{Soil}_{\mathrm{Depth}}\times \mathrm{Percent}_{\mathrm{Slope}}}\right) \quad (8)$$

式中：$\mathrm{Drainage}_{\mathrm{Area}}$为集水区栅格数量(无量纲)；$\mathrm{Soil}_{\mathrm{Depth}}$为土层深度(mm)；$\mathrm{Percent}_{\mathrm{Slope}}$为坡度百分比(%)。

土壤饱和导水率由Cosby土壤传递公式所得，计算公式为

$$K_{\mathrm{sat}}=114.8\times 10^{(-0.6+1.26\times 10^{-2}\mathrm{sand}-6.4\times 10^{-3}\mathrm{clay})} \quad (9)$$

式中：sand为土壤砂粒含量(%)；clay为土壤黏粒含量(%)。

表1 InVEST模型各地类生物物理参数

Table 1 Biophysical parameters of each land use type in InVEST model

土地利用类型	植被根系深度/mm	植被系数	LULC_veg	流速系数
水田	300	0.70	1	2 012
旱地	400	0.65	1	900
有林地	3 000	1	1	200
灌木林	2 000	0.90	1	250
疏林地	1 500	0.80	1	300
其他林地	3 000	0.93	1	400
高覆盖度草地	500	0.85	1	500
中覆盖度草地	500	0.65	1	400
低覆盖度草地	500	0.65	1	300
河渠	1	1	0	2 012
湖泊	1	1	0	2 012
水库坑塘	1	1	0	2 012
滩涂、滩地	1	1	0	2 012
城镇用地	1	0.30	0	2 012
农村居民点	1	0.20	0	2 012
其他建设用地	1	0.20	0	2 012
沙地	1	0.20	0	200
盐碱地	1	0.20	0	900
沼泽地	300	0.20	0	900
裸土地	1	0.2	0	1 200
裸岩石质地	1	0.20	0	1 500
其他	1	0.20	0	250

注：表中参数参见文献[20-21，23]，其中LULC_veg是包含采用何种实际蒸散量公式的信息，具有植被(除了湿地)土地利用/覆被赋值为1，其他赋值为0。

1.3.3 影响因素及驱动因子分析

基于水量平衡法可知，水源涵养量与降水量、蒸散发量、地表径流量和植被覆盖类型等因素密切相关。其中，气象要素中的降水量和蒸散量变化反映水量平衡中的收入和支出。人类活动引起的土地利用类型、植被覆盖等的变化，通过影响生态系统组成和水文过程进而影响其水源涵养能力。因此，本研究选取影响水源涵养功能的气候因子(降水量X_1，温度X_2，风速X_3)、地形因子(高程X_4，坡度X_5，地貌类型X_6)、土壤因子(土壤类型X_7)、植被因子(NDVI X_8和植被类型X_9)和土地利用类型X_{10}等10个因子作为探

测因子,分析毛乌素沙地 2000,2005,2010,2015 和 2024 年年均水源涵养功能变化的驱动因素。地理探测器可基于统计学原理对研究对象的空间分异性进行探测,并厘清主导空间分异的驱动因子的贡献[10]。本研究中主要通过使用 Optimal Parameters Geodetector 的因子探测器和交互探测器来量化多个解释变量对水源涵养功能空间分异的驱动力。

(1) 分异及因子探测。可以解释某 X 因子在多大的程度上可以解释因变量 Y 的空间分异,结果用 q 值表示,当分层是由 X 因子产生的时候,q 值越大表示 X 因子对因变量 Y 的解释力越强,反之越弱。

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{10}$$

式中:$h=1\cdots$;L 为变量 Y 或因子 X 的分层,即分类或分区;N_h,N 分别为层 h 和全区的单元数;σ_h^2,σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。

(2) 交互探测器。识别不同影响因子共同作用下对因变量的影响。通过交互探测器计算任意两个因子的交互效应的解释力 q 值,以分析因子共同作用对水源涵养功能的解释能力。交互作用如表 2 所示。

表 2　因子交互探测作用判断结果

Table 2　Assessment of interaction effects between factors

交互作用	判断关系式
非线性减弱	$q(X_1\cap X_2)<\min(q(X_1), q(X_2))$
单因子非线性减弱	$\min(q(X_1), q(X_2))<q(X_1\cap X_2)<\max(q(X_1), q(X_2))$
双因子增强	$q(X_1\cap X_2)>\max(q(X_1), q(X_2))$
独 立	$q(X_1\cap X_2)=\max(q(X_1), q(X_2))$
非线性增强	$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$

2　结果与分析

2.1　不同土地利用类型下水源涵养量的变化

土地利用变化可通过改变下垫面特性,对土壤孔隙度产生影响,进而对水源涵养量产生直接或间接影响[25]。如表 3 所示,研究初期草地面积比例最大,其次是未利用地、耕地和林地,而水域和建设用地面积比例较小。相较于 2000 年,建设用地和林地面积分别增加了 1 221.65 和 489.64 km^2;其他类型面积均呈减少趋势,其中,耕地面积减少 733.08 km^2,是降幅最大的土地利用类型,草地和未利用地面积分别减少 635.22 和 367.02 km^2。草地面积的减少是因为随着生态工程的实施,将部分草地转变为灌木林地。

表 3　毛乌素沙地不同土地利用类型及水源涵养量

Table 3　Land use types and water conservation capacity in Mu Us sandy land

土地利用类型	2000 年				2024 年			
	面积/km^2	比例/%	水源涵养量/10^6 m^3	比例/%	面积/km^2	比例/%	水源涵养量/10^6 m^3	比例/%
耕 地	13 272.60	15.29	114.41	17.57	12 539.92	14.45	119.95	5.55
林 地	2 148.38	2.48	2.39	0.37	2 638.02	3.04	5.26	0.24
草 地	50 233.00	57.87	480.66	73.82	49 597.78	57.13	534.59	24.72
水 域	1 069.92	1.23	0.16	0.02	1 093.95	1.26	0.77	0.04
建设用地	411.50	0.47	0.37	0.06	1 633.15	1.88	23.84	1.10
未利用地	19 671.60	22.66	53.12	8.16	19 304.58	22.24	1 477.71	68.35
合 计	86 807.00	100.00	651.11	100.00	86 807.00	100.00	2 162.12	100.00

在 GIS 技术支持下,将 2000—2024 年典型时段土地利用类型分布图和对应年份的水源涵养功能空间分布图叠加,统计分析土地利用面积和平均水源涵养深度的关系(图 2)。选取 2000 年和 2024 年,分期评估不同土地利用类型对水源涵养的影响。结果表明,2000 年研究区不同土地利用类型水源涵养深度依次为:草地>耕地>未利用地>林地>建设用地>水域;2024 年研究区不同土地利用类型水源涵

养深度依次为:未利用地>草地>耕地>建设用地>林地>水域。其中,未利用地、草地和耕地3者合计贡献了研究区水源涵养量的90%以上(图3)。如表3所示,林地面积的增加和植被覆盖率的提升减少了地表径流,促进了水源涵养量的增加。本研究中,草地转换为灌木林地使其水源涵养量得到显著提升。建设用地的水源涵养深度很大,但因易形成地表径流流失而使水源涵养量极低。由图2可知,土地利用变化使水源涵养深度发生显著的空间分异。具体表现为水源涵养量的空间分布均东南部高,中部及西部低的空间分布格局。草地是水源涵养功能最好的土地利用类型。

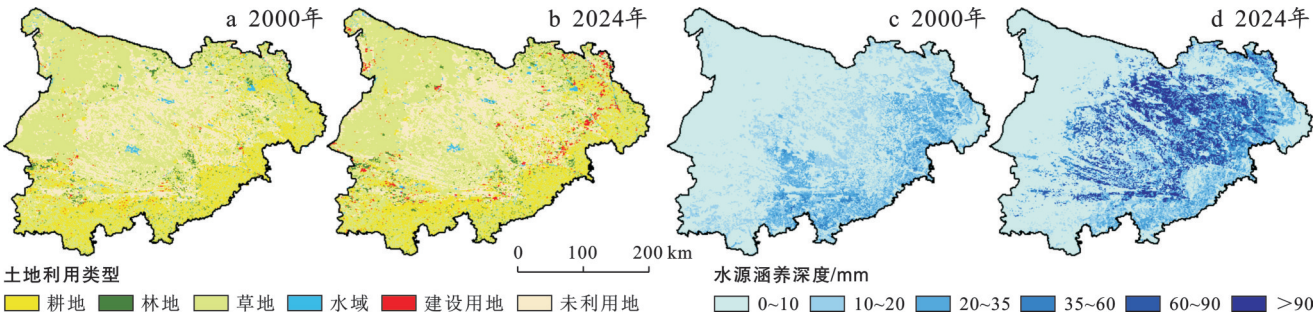

图2 毛乌素沙地土地利用及水源涵养量

Fig.2 Land use and water conservation capacity of Mu Us sandy land

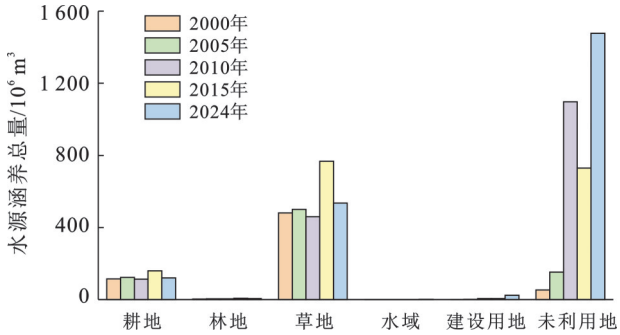

图3 毛乌素沙地2000—2024年不同地类水源涵养量变化

Fig.3 Changes in water conservation of different land use types in Mu Us sandy land from 2000 to 2024

2.2 降水量和潜在蒸发量演变特征

从水量平衡原理可知,降水和潜在蒸发是影响区域水源涵养能力的重要气象要素。由图4可以看出,在空间分布上,毛乌素沙地多年平均降水量约为497.08 mm,自东部向西递减至约122.89 mm,这与东亚季风区自东南向西北递减的降水,以及毛乌素沙地自东向西海拔逐渐增高的地形有关。由图5可知,毛乌素沙地多年平均降水量呈东南高,西北低趋势,空间差异和年际变率大,但总体上呈增加趋势,增加率为9.594 mm/a。

毛乌素沙地多年平均潜在蒸发量为1 135.172 mm,2000—2024年年平均潜在蒸发量呈现非显著性上升趋势,其中,最大值和最小值分别出现在2021年(1 275.866 mm)和2003年(1 088.860 mm)。依据水量平衡原理,研究区降水的年际增长速率高于潜在蒸发的增长速率,是水源涵养量呈增加趋势的核心驱动因素。

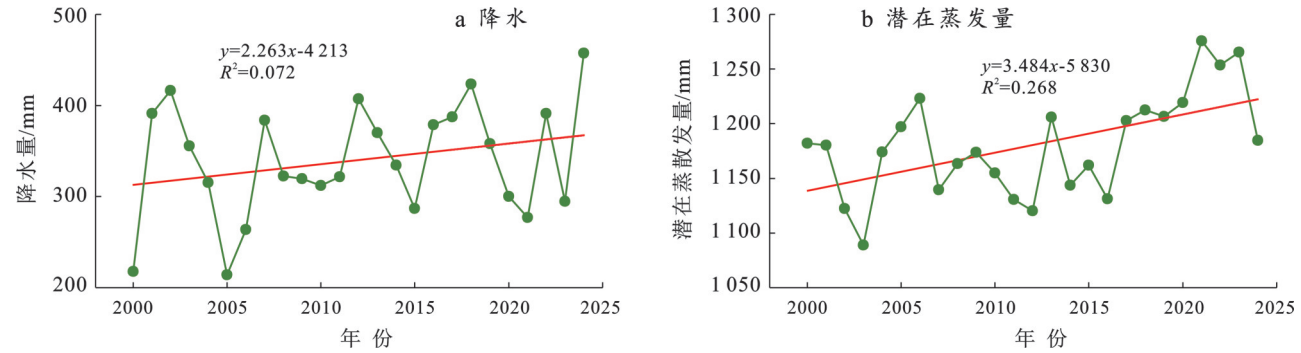

图4 毛乌素沙地降水量和潜在蒸发量变化趋势

Fig.4 Trends of precipitation and potential evapotranspiration in Mu Us sandy land

2.3 水源涵养功能时空演变

研究区2000—2024年水源涵养服务呈显著的时间异质性。在研究时段内,产水量呈持续增加趋势,年均增速为8.037×10^{7} m³/a。研究区产水量整体呈现增加趋势,产水量从1.71×10^{9} m³增加至3.72×10^{9} m³,平均产水量为2.73×10^{9} m³。其中,最大值和最小值

分别出现在2024和2000年。以2000年为基准年,水源涵养深度和水源涵养量均呈波动上升趋势,但在不同时期的趋势不同。其中,2024年产水量较2000年增加了117.58%(图6)。水源涵养深度从7.50 mm增长至24.64 mm,平均增速为0.685 mm/a。其中,2024年水源涵养深度相较于2000年增加了228.44%。研究区2000—2024年水源涵养深度和水源涵养量均呈先增加后减少再增加的趋势。具体而言,2024年水源涵养深度和水源涵养量达到峰值,分别为24.64 mm和2.16×10^9 m^3。2015年相较于2010年水源涵养深度和水源涵养量呈现轻微下降趋势,从2010年的19.38 mm和1.68×10^9 m^3下降至2015年的19.21 mm和1.67×10^9 m^3,反映出此阶段人类活动干扰与气候变化叠加导致的水源涵养功能出现轻微衰退风险。

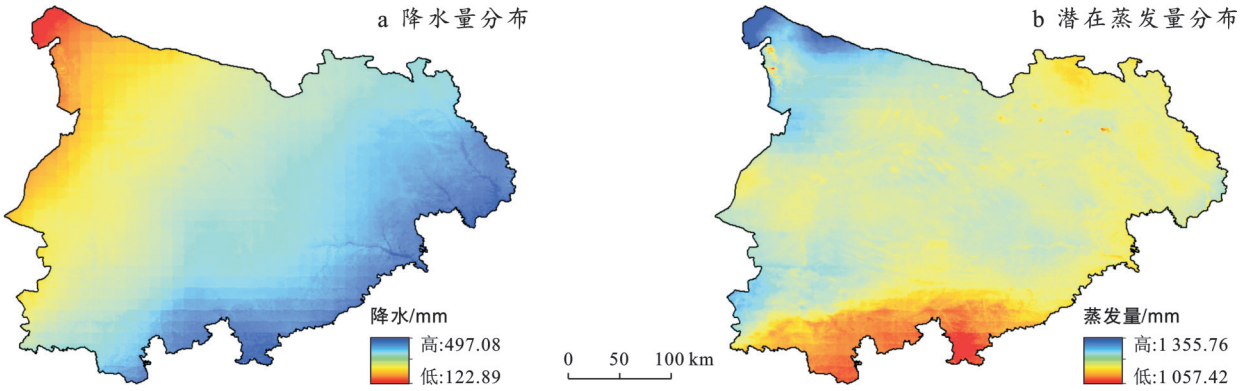

图5　毛乌素沙地降水量和潜在蒸发量变化空间分布

Fig.5　Spatial distribution of precipitation and potential evapotranspiration in Mu Us sandy land

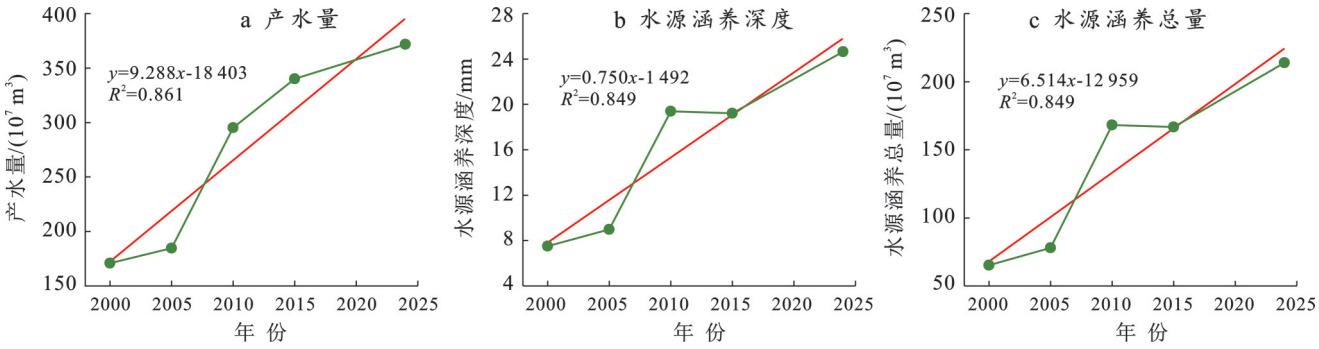

图6　毛乌素沙地2000—2024年产水量与水源涵养量时间变化

Fig.6　Temporal changes in water yield and water conservation capacity in Mu Us sandy land from 2000 to 2024

从空间分布来看,研究区的水源涵养量呈现显著的空间分异特征,其水源涵养深度呈南部高、西北低的特征(图7)。高值区(>35 mm)主要分布于神木市、榆阳区、横山区、靖边县、定边县和伊金霍洛旗,并随时间推移有明显扩张趋势,具体表现为高值区于2010—2024年扩展到乌审旗、盐池县和鄂托克前旗,其高值区范围存在年际波动,且逐渐从东南向西北扩张。低值区(<10 mm)主要分布于鄂托克旗、鄂托克前旗和盐池县部分地区。为验证模型的适用性,采用同期研究区所涵盖3个省、自治区(内蒙古、陕西和宁夏)所属城市的水资源公报、统计年鉴等地表水资源相应径流深数据作为实测数据,通过不断调节季节参数Z,使模拟产水量更接近实测产水量,其中,2000,2005,2010,2015和2024年的相对误差分别为−1.251%,0.674%,−0.283%,−1.395%和−1.678%,模拟值和实测值具有较高的相关性,由此可知,InVEST模型可用于毛乌素沙地产水量的计算。

2.4　水源涵养服务驱动因素分析

2.4.1　单因子分析

在单因子探测计算过程中,按q值大小排序,对影响水源涵养功能的气候、地形、土壤、植被和土地利用类型等5类自然因素10个因子进行排序。结果表明,2000—2024年10个驱动因子对研究区的水源涵养功能空间分异的解释力均通过显著性检验($p<0.05$),其解释力由大到小依次为:土地利用(24.60%)>降水(24.30%)>土壤类型(18.20%)>地貌类型(13.20%)>风速(7.30%)>NDVI(6.50%)>植被类型(4.90%)=高程(4.90%)>温度(4.40%)>坡度(3.70%)(表4)。选取2000,2005,

2010,2015 和 2024 年 5 个典型年份,基于探测因子 q 值变化分析影响研究区水源涵养功能空间分异的驱动因素,结果表明,降水量、土壤、地貌和土地利用类型是对水源涵养功能空间分异解释力最强的因子。

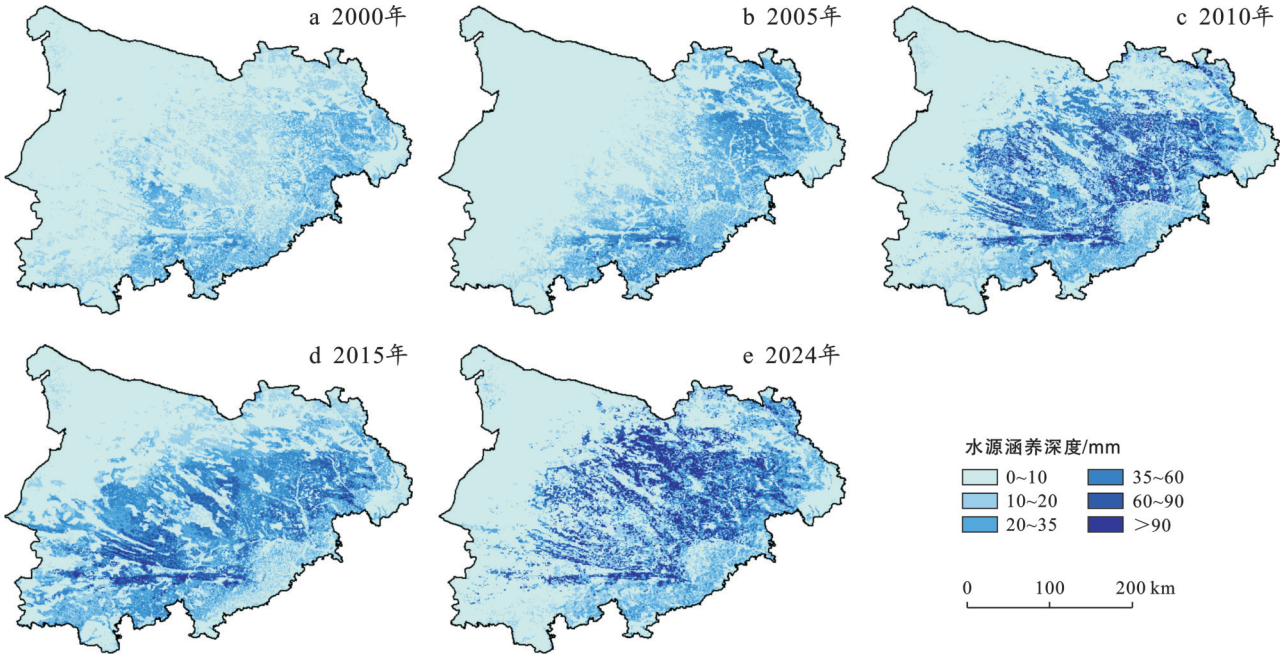

图 7 毛乌素沙地 2000—2024 年水源涵养量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of water conservation in Mu Us sandy land from 2000 to 2024

表 4 各年探测因子 q 值结果

Table 4 Results of q values for detection factors in each year

因 子	q 值(排序)					q 均值
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2024 年	
X_1(降水量)	0.331*(1)	0.425*(1)	0.151*(2)	0.209*(1)	0.099*(4)	0.243
X_2(温度)	0.058*(8)	0.061*(8)	0.016*(10)	0.072*(5)	0.015*(9)	0.044
X_3(风速)	0.167*(3)	0.050*(9)	0.025*(8)	0.061*(7)	0.062*(5)	0.073
X_4(高程)	0.045*(10)	0.081*(7)	0.042*(5)	0.026*(9)	0.050*(6)	0.049
X_5(坡度)	0.056*(9)	0.043(10)	0.025*(7)	0.037*(8)	0.025*(7)	0.037
X_6(地貌类型)	0.164*(4)	0.151*(4)	0.109*(4)	0.130*(4)	0.105*(3)	0.132
X_7(土壤类型)	0.240*(2)	0.233*(2)	0.128*(3)	0.160*(3)	0.148*(2)	0.182
X_8(NDVI)	0.064*(7)	0.170*(3)	0.017*(9)	0.062*(6)	0.014*(10)	0.065
X_9(植被类型)	0.095*(6)	0.085*(6)	0.025*(6)	0.019*(10)	0.021*(8)	0.049
X_{10}(土地利用类型)	0.112*(5)	0.093*(5)	0.275*(1)	0.209*(2)	0.543*(1)	0.246

注:*表示通过 $p \leqslant 0.05$ 显著性检验。

2.4.2 多因素交互作用分析

鉴于单一因子无法完全解释水源涵养功能的空间分异性,需考虑多因子之间的协同和交互作用。交互探测器可用以确定各因子之间的交互作用,评价两两因子之间交互作用对研究区的水源涵养量的影响是增强还是削弱。交互探测器分析结果表明,各因子之间对研究区水源涵养服务的影响均存在增强型交互作用(图 8)。相较于单因子分析,各因子间的交互作用均强于单因子 q 值的影响。总结不同年份的具体分析能够发现,土地利用类型和降水之间的交互作用能够增强单因子对水源涵养功能空间分异的解释力。这也印证了土地利用类型和降水是主导研究区水源涵养功能空间分异的主导因子,与单因子探测结果一致。综合 2000,2005,2010,2015 和 2024 年的基于交互探测器的探测因子 q 值变化的探测结果,降水、土地利用类型、土壤类型、地貌类型和

高程是影响水源涵养功能空间变化的主要驱动因素,其耦合作用加强了其他因素对水源涵养空间分异的影响程度,上述各因子间的两两交互作用对水源涵养能力空间分异的解释力均稳定在30%以上。整体看来,不同驱动因子在各时段对于毛乌素沙地水源涵养功能的影响存在较大差异,使得各影响因子的解释力存在较大年际变化。结合单因子探测的结果,可以判断土地利用类型、降水、土壤类型和地貌类型是影响研究区水源涵养量空间变化的主要因素。

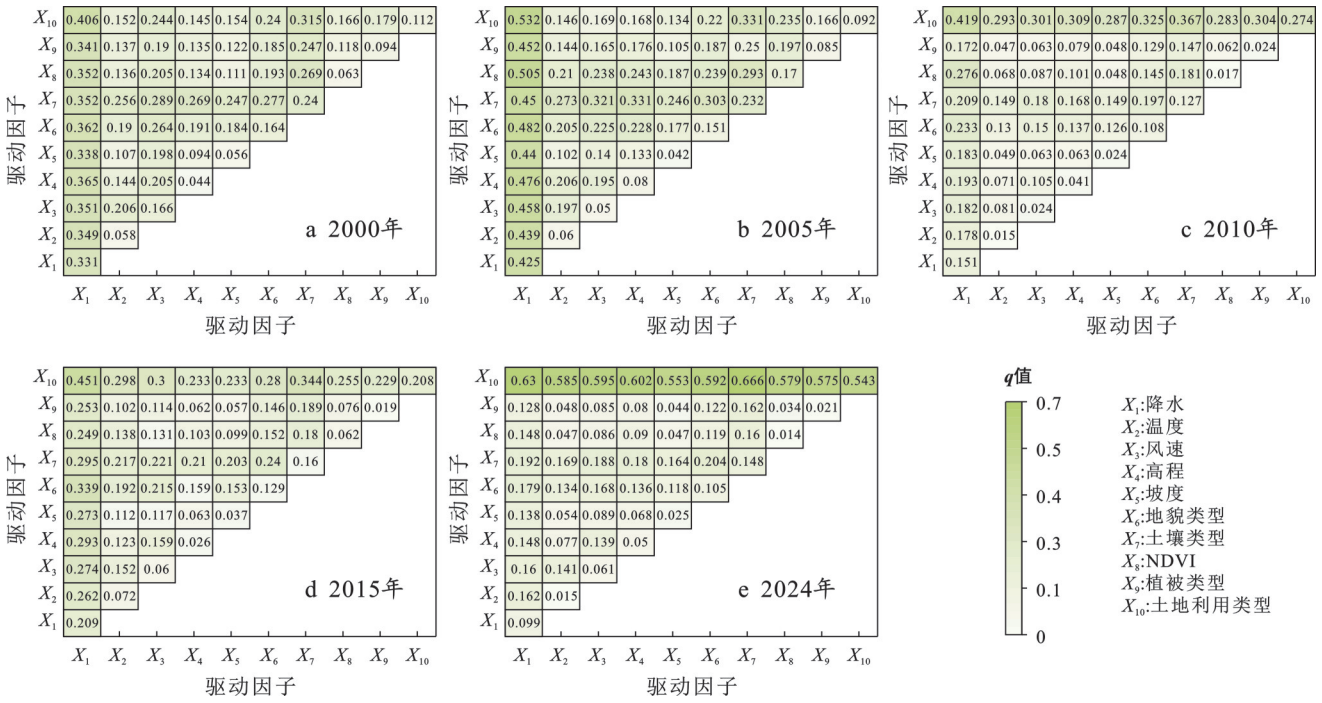

图 8　因子交互作用探测结果

Fig. 8　Results of factor interaction detection

3　讨　论

3.1　毛乌素沙地水源涵养功能时空变化

本研究结果显示,毛乌素沙地水源涵养量总体呈增加趋势,但具有明显的时段和区域差异。从时间尺度上看,2000—2024年研究区水源涵养量呈先升后降的动态演变特征。2024年水源涵养量为历年峰值,相较2000年增加了228.44%,这与张梦嫚等[14]对毛乌素沙地同期的水源涵养服务的相关研究结果基本一致。从空间尺度来看,毛乌素沙地水源涵养服务呈现明显空间异质性,整体上呈现自东向西递减的趋势。水源涵养服务的高值区域主要集中分布于毛乌素沙地南部,较低区域主要集中西北部,这与已有研究结果一致[26-28]。

3.2　毛乌素沙地水源涵养功能影响因素

影响区域水源涵养量的因素包括气象条件、土地利用、地形和人类活动等。其中,降水量是直接影响生态系统水源涵养量增减的关键影响因子。这与本研究基于地理探测器的分析结论一致。基于水量平衡原理中的收支项可知,区域的水源涵养量决定于降水量和蒸散发[20]。2000—2024年毛乌素沙地的降水量变化范围为122.89~497.08 mm,同时以9.594 mm/a的变化速率增长,这与中国西北地区气候"暖湿化"趋势相吻合[29]。近年来中国北方风沙区风速减小[30],水汽压逐渐增加,即使温度持续升高,蒸散发相应地呈微弱增加趋势,这与本文的研究结果一致。降水量与蒸散量差值的增加是毛乌素沙地水源涵养量呈增加趋势的主要原因。水源涵养量的阶段性变化是由土地利用变化导致植被覆盖度和蒸散发的改变引起的。毛乌素沙地因大规模退耕还林和生态工程的实施,植被覆盖度显著增大,进而使植被冠层截留量和蒸散量增加,土壤含水量减少,最终影响当地的降水-产流关系。植被恢复初期因工程开挖导致土壤入渗率增大,饱和导水率提高,土壤蓄水容量增加,从而使水源涵养量呈线性增加趋势。后期则因植被盖度增大使蒸腾作用和截留量增加,在干旱年份,植被恢复导致水源涵养量减少的现象尤为明显,乃至于出现土壤干层。这与Feng等[31]的研究结果一致。

以生态工程为代表的绿洲化和荒漠化相互博弈

使生态系统景观格局-过程-功能发生相应变化。景观格局的动态变化可以改变生物耗水过程,进而影响水源涵养功能。土地利用和植被覆盖会改变径流系数和蒸散系数间接影响水源涵养量。不同土地利用类型对水源涵养的贡献不同。本研究中草地水源涵养量显著高于耕地和未利用地,这与张昌顺等[32]的研究结论一致。一方面是由于研究区草地面积比例最大,植被冠层对降水的截留效应显著,另一方面,研究区草地土壤多为干旱土,疏松多孔,对降水具有较好的涵养效应。林地水源涵养量低于耕地和未利用地主要是由于降水增加无法弥补日益增加的植被蒸散发需求[33]。这与Wang等[34]的研究结果类似,人工植被进一步增加可能会威胁到研究区水资源安全,不建议进一步扩大植树造林面积[35]。城市化造成的城镇面积扩张占用植被资源和不透水层影响水分的渗透性是造成水源涵养能力下降的主要原因。

4 结 论

(1)从时间尺度上看,毛乌素沙地2000—2024年产水量呈现增加趋势,水源涵养深度和水源涵养量的总体呈波动增加趋势。相较于2000,2024年平均水源涵养量增加了228.44%。毛乌素沙地多年平均水源涵养能力呈现由西北向东南递增的空间分布格局。水源涵养深度的多年均值为13.77 mm,水源涵养量的多年均值为1.20×10^{9} m^3。从空间尺度上看,毛乌素沙地水源涵养服务呈现明显的空间异质性,但不同时期水源涵养服务空间分异变化较小。草地是水源涵养功能最强的土地利用类型,研究区生态工程建设时应注重草地植被的恢复。

(2)地理探测器分析结果表明了各种自然因子对毛乌素沙地水源涵养功能空间分异的驱动机制及其时空演变特征。其中,单因子探测结果表明,土地利用、降水和土壤类型是对水源涵养功能变化解释力最强的因子。交互探测结果表明,降水、土地利用类型、土壤类型、地貌类型和高程等的耦合作用加强了其他因素对水源涵养空间分异的影响程度。

参考文献(References)

[1] 赵晓萌,程宏,蒋宁,等.京津风沙源土壤风蚀时空格局及其演化[J].科学通报,2023,68(S1):238-253.
Zhao Xiaomeng, Cheng Hong, Jiang Ning, et al. Spatial and temporal evolution of soil wind erosion in the Beijing-Tianjin sandstorm sources [J]. Chinese Science Bulletin, 2023,68(S1):238-253.

[2] 卢琦,肖春蕾,包英爽,等.打赢"三北"攻坚战,再造一个"新三北":实现路径与战略规划[J].中国科学院院刊,2023,38(7):956-965.
Lu Qi, Xiao Chunlei, Bao Yingshuang, et al. Implementation path and strategic planning of winning the battle of "Three-North" and reconstructing "New Three-North" [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023,38(7):956-965.

[3] 郭二果,李现华,祁瑜,等.国家北方重要生态安全屏障保护与建设[J].中国环境管理,2021,13(2):80-85.
Guo Erguo, Li Xianhua, Qi Yu, et al. Ecological protection and construction of the national ecological security barrier in Inner Mongolia Region [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021,13(2):80-85.

[4] 李思琪,王海兵,袁晓飞,等.毛乌素沙地景观生态风险时空演变及驱动力[J].中国沙漠,2025,45(5):230-240.
Li Siqi, Wang Haibing, Yuan Xiaofei, et al. Temporal and spatial evolution of landscape ecological risks and driving forces in the Mu Us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2025,45(5):230-240.

[5] Li Changjia, Fu Bojie, Wang Shuai, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021,2(12):858-873.

[6] Wu Changxue, Gao Peng, Xu Ruirui, et al. Influence of landscape pattern changes on water conservation capacity: A case study in an arid/semiarid region of China [J]. Ecological Indicators, 2024,163:112082.

[7] 吕一河,胡健,孙飞翔,等.水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务[J].生态学报,2015,35(15):5191-5196.
Lü Yihe, Hu Jian, Sun Feixiang, et al. Water retention and hydrological regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):5191-5196.

[8] Cao Yanping, Xie Zunyi, Woodgate W, et al. Ecohydrological decoupling of water storage and vegetation attributed to China's large-scale ecological restoration programs [J]. Journal of Hydrology, 2022,615:128651.

[9] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
Zhou Jiawen, Gao Jixi, Gao Zhiqiu, et al. Analyzing the water conservation service function of the forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(5):1679-1686.

[10] Xu Haojie, Zhao Chuanyan, Wang Xinping, et al. Spatial differentiation of determinants for water conservation dynamics in a dryland mountain [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,362:132574.

[11] 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 reten-

tion concept [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1):139-148.

[12] 左其亭,王娇阳,杨峰,等.水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法[J].水利水电科技进展,2022,42(2):13-19.
Zuo Qiting, Wang Jiaoyang, Yang Feng, et al. Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022,42(2):13-19.

[13] Jia Guanyu, Hu Wenmin, Zhang Bin, et al. Assessing impacts of the ecological retreat project on water conservation in the Yellow River basin [J]. Science of the Total Environment, 2022,828:154483.

[14] 张梦嫚.毛乌素沙地植被恢复以及其对生态系统服务的影响[D].北京:北京林业大学,2020.
Zhang Mengman. Vegetation restoration and its impact on ecosystem services in Mu Us sandy land [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[15] Han Xueying, Jia Guangpu, Yang Guang, et al. Spatiotemporal dynamic evolution and driving factors of desertification in the Mu Us sandy land in 30 years [J]. Scientific Reports, 2020,10:21734.

[16] Zhou Daojing, Zhao Xia, Hu Huifeng, et al. Long-term vegetation changes in the four mega-sandy lands in Inner Mongolia, China [J]. Landscape Ecology, 2015, 30(9):1613-1626.

[17] 王鑫,刘新月,母艳梅,等.毛乌素沙地植被物候变化及其对气候的响应[J].北京林业大学学报,2023,45(7):61-75.
Wang Xin, Liu Xinyue, Mu Yanmei, et al. Changes in vegetation phenology and its responses to climatic factors in the Mu Us Desert [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,45(7):61-75.

[18] 韩雪莹.近30年毛乌素沙地沙漠化土地时空动态变化及其自相关研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
Han Xueying. Spatial and temporal dynamics and spatial autocorrelation of desertification land in Mu Su sandy land in recent 30 years [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.

[19] 常文静,丛士翔,王融融,等.气候变化和人类活动对毛乌素沙地NDVI变化的量化分析[J].干旱区地理,2025,48(1):63-74.
Chang Wenjing, Cong Shixiang, Wang Rongrong, et al. Quantitative analysis of NDVI changes in Mu Us sandy land by climate change and human activities [J]. Arid Land Geography, 2025,48(1):63-74.

[20] 谢展,李萍,刘文倩,等.气候变化和植被恢复对黄土高原水源涵养功能时空变化的影响[J].生态学报,2024,44(23):10915-10935.
Xie Zhan, Li Ping, Liu Wenqian, et al. Spatial and temporal changes in water conservation in the Loess Plateau under the influence of climate change and vegetation restoration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23): 10915-10935.

[21] 赵亚茹,周俊菊,雷莉,等.基于InVEST模型的石羊河上游产水量驱动因素识别[J].生态学杂志,2019,38(12):3789-3799.
Zhao Yaru, Zhou Junju, Lei Li, et al. Identification of drivers for water yield in the upstream of Shiyang River based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(12):3789-3799.

[22] Sun Zenghui, Mao Zhongan, Yang Liangyan, et al. Impacts of climate change and afforestation on vegetation dynamic in the Mu Us Desert, China [J]. Ecological Indicators, 2021,129:108020.

[23] 贾天朝,文琦,施琳娜,等.黄河流域县域水源涵养与人类活动时空耦合及其空间关联[J].环境科学,2025(8):5112-5121.
Jia Tianchao, Wen Qi, Shi Linna, et al. Spatiotemporal coupling and spatial correlation between water conservation and human activities in counties of the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2025(8): 5112-5121.

[24] 石莹,别强,苏晓杰,等.基于InVEST模型的水源涵养功能评价的时空变化:以兰州市为例[J].干旱区地理,2024,47(9):1518-1529.
Shi Ying, Bie Qiang, Su Xiaojie, et al. Spatiotemporal variation of water conservation function evaluation based on InVEST model: A case of Lanzhou City [J]. Arid Land Geography, 2024,47(9):1518-1529.

[25] 文志,赵赫,刘磊,等.土地利用变化对海南土壤水源涵养功能的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4025-4033.
Wen Zhi, Zhao He, Liu Lei, et al. Effects of land use changes on soil water conservation in Hainan Island, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12):4025-4033.

[26] 汪丁.宁夏回族自治区生态系统服务动态变化及其驱动因素研究[D].北京:中国环境科学研究院,2023.
Wang Ding. Dynamic changes and driving factors of ecosystem services in Ningxia Hui Autonomous Region [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2023.

[27] 樊军,刘岩.黄土高原农牧交错区生态建设的关键问题思考[J].应用生态学报,2025,36(12):3557-3562.
Fan Jun, Liu Yan. Key issues concerning ecological con-

struction in the agro-pastoral ecotone on the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(12):3557-3562.

[28] 安健吉,员学锋,杨悦,等.退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务的影响[J].环境科学,2025,46(4):2410-2427.
An Jianji, Yuan Xuefeng, Yang Yue, et al. Effect of the grain for green program on ecosystem services in northern Shaanxi, China [J]. Environmental Science, 2025,46(4):2410-2427.

[29] 张强,杨金虎,王朋岭,等.西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J].科学通报,2023,68(14):1814-1828.
Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2023,68(14):1814-1828.

[30] Wang Li, Hou Chengzhi, Pang Xianghao, et al. Slowdown of dune migration in east Asia's inland deserts: A 35-year response to wind stilling [J]. Geophysical Research Letters, 2025,52(16):e2024GL113506.

[31] Feng Xiaoming, Sun Ge, Fu Bojie, et al. Regional effects of vegetation restoration on water yield across the Loess Plateau, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16(8):2617-2628.

[32] 张昌顺,范娜,刘春兰,等.1990—2018年中国生态系统水源涵养功能时空格局与演变[J].生态学报,2023,43(13):5536-5545.
Zhang Changshun, Fan Na, Liu Chunlan, et al. Spatio-temporal pattern and evolution of ecosystem water conservation in China from 1990 to 2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(13):5536-5545.

[33] 薛宝林,周璇,王国强,等.雅鲁藏布江生态系统水源涵养功能变化及其驱动因素[J].生态学报,2025,45(7):3157-3168.
Xue Baolin, Zhou Xuan, Wang Guoqiang, et al. Changes in water retention function of the Yarlung Zangbo River ecosystem and identification of its leading influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(7):3157-3168.

[34] Wang Yanhui, Yu Pengtao, Feger K H, et al. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China [J]. Ecohydrology, 2011,4(2):277-287.

[35] Holl K D, Brancalion P H S. Tree planting is not a simple solution [J]. Science, 2020, 368(6491): 580-581.

(上接第136页)

[27] 庄正,张芸,张颖,等.不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J].水土保持学报,2017,31(6):183-188.
Zhuang Zheng, Zhang Yun, Zhang Ying, et al. Study on distribution characteristics and stability of soil aggregate in Chinese fir plantation at different developmental stages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):183-188.

[28] 赵世伟,苏静,吴金水,等.子午岭植被恢复过程中土壤团聚体有机碳含量的变化[J].水土保持学报,2006,20(3):114-117.
Zhao Shiwei, Su Jing, Wu Jinshui, et al. Changes of soil aggregate organic carbon during process of vegetation restoration in Ziwuling [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(3):114-117.

[29] 赵世伟,苏静,杨永辉,等.宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J].水土保持研究,2005,12(3):27-28.
Zhao Shiwei, Su Jing, Yang Yonghui, et al. Influence of the soil structure in loess hilly region of southern Ningxia under different man-made vegetation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005,12(3):27-28.

[30] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.黄土高原典型草本植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征[J].生态学报,2025,45(10):4855-4866.
Liu Junyang, Zhou Zhengchao, Su Xuemeng. Spatial and temporal differences in soil erodibility influenced by typical herb roots on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(10):4855-4866.

[31] 朱志昊,孟晨,王兴,等.荒漠草原人工柠条引入后土壤团聚体几何分布及拓扑结构演变特征[J].草业学报,2023,32(11):53-64.
Zhu Zhihao, Meng Chen, Wang Xing, et al. Geometric distribution, formation, and topological structure of soil aggregates after introduction of *Caragana korshinskii* on the desert steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(11):53-64.