

不同防风固沙供需风险下生态系统服务的变化 ——以陕北榆林风沙区为例

牛苗苗¹, 朱志梅^{1,2}, 董少侠¹, 车传禹¹

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127)

摘 要: 选取防风固沙(windbreak and sand fixation, WS)生态系统服务(ecosystem services, ESs)对陕北榆林风沙区的生态风险进行评价。利用风蚀方程 RWEQ 模型, 量化 2007 年、2015 年和 2023 年该研究区的防风固沙生态系统服务的供需量, 计算生态系统服务供需比(ecosystem services supply-demand ratio, ESDR), 确定研究区防风固沙服务的供需平衡状态, 结合供需均衡度变化值评价研究区的防风固沙服务供需风险, 并探究防风固沙风险是否影响水资源供给(water provision, WP)服务和土壤保持(soil conservation, SC)服务。研究表明:(1)研究区 3 个年份 WS 服务供给总量分别为 1.540×10^7 t、 1.898×10^7 t、 2.193×10^7 t, 需求总量分别为 2.046×10^7 t、 2.165×10^7 t、 2.300×10^7 t, 均呈逐渐递增的趋势, 从局部来看, 每年单位面积 WS 服务供给量和需求量均为榆阳区最大, 府谷县最小;(2)3 个年份 ESDR <0 的区域面积占比分别为 65.22%、83.55%、63.36%, 供给量小于需求量的区域占比高, 研究区绝大多数区域属于“赤字”状态;(3)2007—2023 年, 防风固沙服务供需风险总体上呈下降趋势, 但 2023 年高风险区域占比仍高达 59.95%, 主要集中在研究区西北部;(4)随着防风固沙服务供需风险的降低, 水资源供给和土壤保持服务呈逐渐增强的趋势。研究区防风固沙生态系统服务处于高风险状态, 不同的防风固沙供需风险对生态系统服务有不同的影响。

关键词: RWEQ 模型; 防风固沙服务; 生态系统服务供给与需求; 供需风险评价

中图分类号: X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8735(2026)04-0367-10

DOI: 10.3969/j.issn.1001-8735.2026.04.005

生态风险评价是环境管理和可持续发展规划中的关键环节, 它涉及识别、分析和评估生态系统及其服务可能面临的风险, 评价研究区域生态风险情况有助于准确实施生态保护措施^[1-3]。最早的生态风险评价概念是 1992 年由美国环境保护署定义的^[4], 并构建了评价生态风险的研究框架, 后逐步形成成熟的理论和方法。缓解区域生态风险至关重要的一个方面是研究生态系统服务的供给和需求的相对平衡, 在 21 世纪初期, Cormier 等^[5]、Perrodin 等^[6]将生态系统服务整合到生态风险评估框架中, 明确供需关系失衡是区域生态风险加剧的关键诱因。

防风固沙服务是干旱半干旱地区重要的生态系统服务之一, 其供需平衡状态直接反映区域生态安全水平, 是生态风险评价的关键指示指标。通过削弱风力侵蚀、减少沙化扩张, 可降低风沙灾害对生态系统的破坏, 具有显著的生态风险预警作用: 当防风固沙服务供给不足或供需匹配度下降时, 往往伴随沙化加剧、水土流失扩大等连锁风险, 直接威胁区域生态系统稳定性与人类福祉^[7-8]。2025 年 1—4 月, 中国气象局发布了 1 952 条全国沙尘预警, 凸显了干旱半干旱地区防风固沙服务的重要性与风险防控的紧迫性。因此, 综合考虑陕北榆林风沙区特殊的地形地貌, 选择该服务作为调节服务, 评价该地区的防风固沙服务供需风险对研究生态风险具有重要意义。

收稿日期: 2025-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“陕北沙漠化土壤驱动机制与植物的耐胁迫性研究”(30700648)。

作者简介: 牛苗苗(1998—), 女, 在读硕士研究生。

通信作者: 朱志梅(1972—), 女, 副教授, 博士, 主要从事生态学、环境科学研究, E-mail: zhzhmx@126.com。

陕北榆林长城沿线风沙区(简称陕北榆林风沙区)为毛乌素沙漠南缘接壤地带,属于典型生态脆弱区^[9]。该区域土壤以沙土为主,年降水量偏少且分布不均,风力侵蚀强烈,长期面临风蚀沙化与水土流失双重生态风险。近年来,该区域在生态保护和治理方面取得了显著成效,榆林市森林覆盖率已从 0.9% 提升至 36%,沙化土地治理率高达 93.24%,将陕西省绿色版图向北扩大了 400 km^[10-11]。但相对陕西全省来说,陕北榆林风沙区本就是土壤瘠薄、风蚀沙化和水土流失严重的区域,这进一步增加了防风固沙服务的供需不确定性。根据陕西省适应气候变化行动方案,汉中、榆林等地因气候差异可能存在较高的风险等级,亟须提升重点生态脆弱区域适应气候变化能力。

梳理已有研究,米朝娟等^[12]探究了该研究区防风固沙服务能力的影响因素并模拟,但研究只关注防风固沙服务的供给,未关注需求及其平衡,没有对该地区的生态风险进行识别和预测,这导致研究区生态空间规划在满足人类社会需求方面的满意度不足^[13]。水资源供给(WP)服务和土壤保持(SC)服务也是重要生态系统服务功能,根据本研究区域的独特自然属性,选择 WP 作为供应服务,SC 作为支持服务。水是生态系统构成的基本要素,作为生态系统服务的重要组成部分,WP 在研究区水循环、水平衡以及人类生存和发展中发挥着至关重要的作用^[14]。SC 具有减轻土壤侵蚀、水资源保持和维护区域生态安全等作用,生态系统土壤保持服务也是最重要的生态服务功能之一^[15-16]。若流域的水资源短缺变得更加严重,生态系统服务面临退化的风险,可能会对经济和环境产生多米诺骨牌效应^[17]。现有研究缺乏防风固沙服务供需风险对其他关键生态系统服务的影响研究,防风固沙服务的风险变化是否会影响 WP 和 SC 的分布值得讨论。分析 WP 和 SC 在不同防风固沙服务供需风险等级中的分布特征,阐明 WP 和 SC 与防风固沙服务之间的关系,对维持研究区的经济可持续性和保护生态系统服务以增强环境健康和人类福祉至关重要。

基于此,本文拟结合生态系统服务供需理论,开展研究区的防风固沙服务供需风险评价,探究在不同防风固沙供需风险等级下,WP 和 WC 的分布规律及响应机制,以期评价陕北榆林风沙区的生态风险提供依据,为陕北榆林风沙区的生态建设提出相应的生态风险管理策略,并为其他类似区域的生态系统服务供需风险评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕北长城沿线以北的区域为风沙地貌,称为陕北榆林风沙区,主要集中在陕北榆林市,地理位置介于北纬 37°21′~39°29′,东经 107°51′~110°39′,位于黄土高原丘陵沟壑区与毛乌素沙地南缘的接壤地带,包括北部的神木市、府谷县、横山区、榆阳区、靖边县和定边县,本研究将该 6 个县均作为研究区域(图 1)。该区域属于陕北风沙地貌区,地势东低西高,年降水量偏少,土壤类型主要以沙土为主,有利于风力侵蚀的发生。作为干旱频发区,生态系统相对脆弱,易受人类活动干扰和气候变化的影响。这片区域地处毛乌素沙地的东南边缘地带,横跨陕西省榆林市与内蒙古自治区鄂尔多斯市,其面积在 2.4 万~2.8 万 km²之间。榆林市作为退耕还林还草生态修复工程的重点区域,2000 年以来,该地区的生态环境明显改善,植被覆盖度显著增加,坡面侵蚀减弱,入河泥沙量减少,但陕北榆林风沙区土壤水资源匮乏,区域产水能力下降的问题仍然存在^[9]。

1.2 数据来源

本研究选取 2007 年、2015 年及 2023 年研究区的相关数据,数据来源及说明见表 1。所有栅格数据使用 ArcGIS Pro 进行重采样,使用邻近法将 1 km 分辨率栅格数据统一处理为 250 m 分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 防风固沙服务的供给与需求量化 本研究区土壤类型主要以沙土为主,区域的防风固沙服务是最重要的生态服务功能之一^[7],因此有必要分析陕北榆林风沙区的 WS 服务。收集遥感影像数据和社会统计数据,并对其进行处理,用风蚀方程 RWEQ 模型对防风固沙服务的供给和需求进行量化,制成栅格影像图。

潜在风蚀量是无植被即裸地条件下的土壤侵蚀量,无植被裸地条件下潜在的风蚀量与存在植被条

件下的实际风蚀量之间的差值被称为防风固沙服务功能量^[8]。本研究将防风固沙服务功能物理量作为防风固沙服务的供给量,计算公式见式(1)–(3)。实际风蚀量值越大,人类希望其降低的期望值就越高,将其作为防风固沙服务需求量,计算公式如(2)所示。

$$SL_r = \frac{2z}{S_r^2} \cdot Q_{rmax} \cdot e^{-(z/S_r)^2},$$

(1)

$$SL = \frac{2z}{S^2} \cdot Q_{max} \cdot e^{-(z/S)^2},$$

(2)

$$G = SL_r - SL。$$

(3)

式中, SL_r 代表潜在风蚀量(单位 kg/m^2); SL 代表实际风蚀量(单位 kg/m^2)(防风固沙服务需求量);利用穷举法确定下列参数, z 代表计算的顺风距离(单位 m); Q_{max} 代表最大潜在输沙能力(单位 kg/m^2); S_r 代表潜在临界地块长度(单位 m); S 代表临界风蚀能力; G 代表防风蚀量(单位 kg/m^2),即防风固沙服务的物理量(防风固沙服务供给量)。

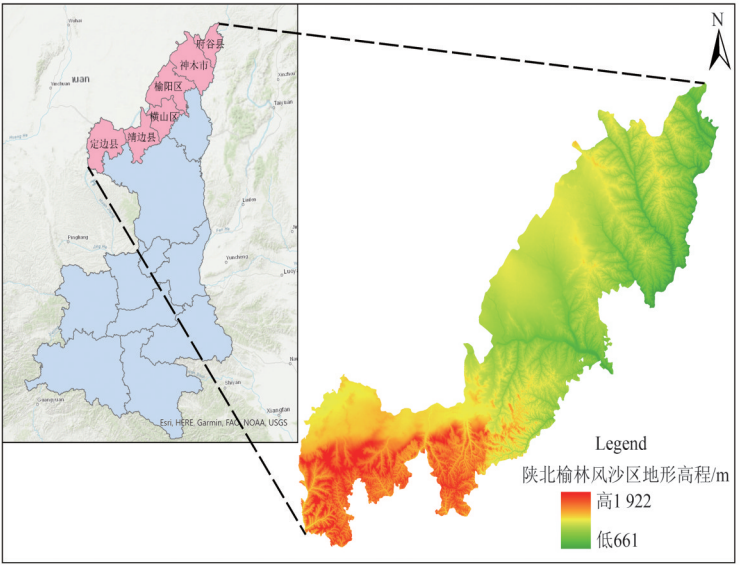


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 The geographical location of the study area

表 1 研究数据来源及说明

Tab. 1 The research data sources and explanations

数据类型	数据来源
数字高程模型(DEM)	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),选用“ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程数据”
风速、温度	中国气象科学数据共享网(https://data.cma.cn)
降水、实际蒸散量数据	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)
2007 年、2023 年 30 m 土地利用数据	武汉大学
土壤类型数据、2015 年土地利用数据	中国科学院资源环境科学数据平台(https://www.resdc.cn/);土壤类型为 1 km 分辨率;土地利用数据为 1 km 分辨率,已重分类为 6 类
土壤相关数据(PAWC、Soil depth、土壤侵蚀因子)	世界土壤数据库(HWSD)

在利用 RWEQ 模型量化防风固沙服务供需过程中,涉及的风蚀因子、土壤可蚀性因子、地表粗糙度因子和植被因子的参数设置及具体模型流程参考文献[12]。

1.3.2 防风固沙服务供需风险识别

(1)计算防风固沙服务供需比。本文利用生态系统服务的供给量和需求量计算出供需比,分析研究区生态系统服务供应与需求之间的关系^[18],分析研究区防风固沙服务的供需匹配情况。供需比(ESDR)是用来反映研究区生态系统的实际供给和人类需求之间的平衡状态,若 $ESDR>0$,则表现为盈余;若 $ESDR=0$,则表现为平衡;若 $ESDR<0$,则表现为赤字;盈余和赤字均称为生态系统服务的不匹配特征^[19]。ESDR 计算公式为

$$E_{SDR} = \frac{S - D}{(S_{max} + D_{max}) \div 2},$$

(4)

式中, E_{SDR} 是防风固沙服务供需比; S 是防风固沙服务的供给量; D 是防风固沙服务的需求量。

(2)计算防风固沙服务供需均衡度。为了反映防风固沙服务供需协调发展状况,本文计算防风固沙服务供需均衡度^[20]。生态系统服务供需均衡度指数接近 1 时协调性最好,接近 0 时协调性最差。

ΔC_v 指协调度变化值, $\Delta C_v > 0$ 时, 供需之间赤字或盈余差距减小, 协调性增加; $\Delta C_v = 0$ 时, 协调性不变; $\Delta C_v < 0$ 时, 供需之间赤字或盈余差距增加, 协调性降低^[21]。计算公式为

$$C_v = \sqrt{\frac{S \times D}{[(S + D)/2]^2}}, \quad (5)$$

$$\Delta C_v = C_{v,m} - C_{v,n}, \quad (6)$$

式中, C_v 为生态系统服务供需均衡度指数; ΔC_v 是协调度变化值; $C_{v,m}$ 是第 m 年的供需均衡度指数; $C_{v,n}$ 是第 n 年的供需均衡度指数。

防风固沙服务供需风险识别是以防风固沙服务 ESDR 和供需均衡度变化值(ΔC_v)为依据, 将供需风险分为 5 个等级(表 2)。

1.3.3 生态系统服务的量化

(1) 水资源供给的量化

从生态系统维持水量平衡的角度而言, 决定生态系统水供给量的两个关键环节是降水和实际蒸散量^[22], 以 ArcGIS Pro 软件和 InVEST 模型为平台, 基于研究区大量实测空间数据, 对研究区的水供给服务展开评估。计算公式为

$$W_x = \left(1 - \frac{E_x}{P_x}\right) \times P_x. \quad (7)$$

式中, W_x 为栅格单元的产水量, E_x 为栅格单元 x 的年平均蒸散量, P_x 为栅格单元 x 的年均降水量(单位均为 mm), E_x/P_x 为蒸散量与降水量的比。

(2) 土壤保持服务的量化

实际土壤侵蚀量是指在考虑了地表植被覆盖和实施了水土保持措施之后, 该区域内实际发生的土壤流失量, 见公式(8); 潜在土壤侵蚀量是指没有植被保护和水土保持措施的情况下, 关键生态功能区内可能发生的土壤流失量^[15], 见公式(9)。研究区的潜在土壤侵蚀量和实际土壤侵蚀量可以采用修正后的通用土壤流失方程(the revised universal soil loss equation, RUSLE)估算, 二者之差即为土壤保持服务供给量, 见公式(10), 然后进行测算和空间制图^[15]。

$$SC_r = R \times K \times LS \times C \times P, \quad (8)$$

$$SC_p = R \times K \times LS, \quad (9)$$

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P). \quad (10)$$

式中, SC_r 为单位面积实际土壤侵蚀量(单位 $t/(hm^2 \cdot a)$); R 为栅格单元降水侵蚀力因子(单位 $MJ \cdot mm \cdot (hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子(单位 $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot (hm^2 \cdot MJ \cdot mm)^{-1}$); LS 表示坡度坡长因子; C 表示植被覆盖因子; P 表示水土保持因子; SC_p 为潜在土壤侵蚀量; SC 为土壤保持供给量。

1.3.4 标准化水资源供给量和土壤保持服务量 量化 2007—2023 年的水资源供给和土壤保持服务量, 分别提取 5 种防风固沙供需风险等级下的水资源供给量和土壤保持量数据的平均值。分别使用如下标准化公式, 计算每个风险等级下的标准化水资源供给量和土壤保持量, 计算公式见(11)和(12):

$$WP_{ni} = \frac{\overline{WP_i} - \overline{WP_{\min}}}{\overline{WP_{\max}} - \overline{WP_{\min}}}, \quad (11)$$

$$SC_{ni} = \frac{\overline{SC_i} - \overline{SC_{\min}}}{\overline{SC_{\max}} - \overline{SC_{\min}}}, \quad (12)$$

式中, i 是防风固沙服务供需风险等级; WP_{ni} 是标准化水资源供给量; SC_{ni} 是标准化土壤保持量; $\overline{WP_i}$ 是不同风险等级下的水资源供给量平均值; $\overline{SC_i}$ 是不同风险等级下的土壤保持量平均值; $\overline{SC_{\max}}$ 是所有 $\overline{SC_i}$

表 2 防风固沙服务供需风险等级分类表

Tab. 2 The classification table of risk levels for supply-demand of windbreak and sand fixation services

划分指标	风险级别
$ESDR < 0, \Delta C_v \leq 0$	等级 I, 供需重度危险
$ESDR < 0, \Delta C_v > 0$	等级 II, 供需中等危险
$ESDR = 0$	等级 III, 供需平衡
$ESDR > 0, \Delta C_v > 0$	等级 IV, 供需中度安全
$ESDR > 0, \Delta C_v \leq 0$	等级 V, 供需高度安全

中的最大值。

2 结果分析

2.1 防风固沙服务的供给、需求量时空特征分析

利用 ArcGIS Pro 计算得到陕北榆林风沙区 2007 年、2015 年和 2023 年防风固沙服务供给总量分别为 1.54×10^7 t、 1.90×10^7 t、 2.19×10^7 t,呈逐渐递增的趋势。单位面积年供给量值分别介于 $0 \sim 20.02 \text{ kg/m}^2$ 、 $0 \sim 17.90 \text{ kg/m}^2$ 和 $0 \sim 19.77 \text{ kg/m}^2$,如图 2(a)–(c)所示。分区统计研究区各县(市/区)的防风固沙服务供给量,3 个年份单位面积防风固沙服务供给量均为榆阳区>定边县>靖边县>横山区>神木市>府谷县。从局部来看,2007—2015 年间,榆阳区单位面积防风固沙供给量增加较明显,增加了 0.856 kg/m^2 ,这可能与 2007 年榆阳区以退耕还林工程为核心的林业生态建设有关。防风固沙服务供给量空间格局呈西北向东南方向逐渐减少的趋势,其高值区主要分布在定边县和靖边县的北部、横山区北部和西部的小部分区域、榆阳区西北部的大部分区域以及神木市西南部,府谷县是供给量低值区。研究区 2007 年、2015 年和 2023 年防风固沙服务需求总量分别为 2.05×10^7 t、 2.17×10^7 t、 2.30×10^7 t,单位面积年平均需求量值分别介于 $0 \sim 22.90 \text{ kg/m}^2$ 、 $0 \sim 19.01 \text{ kg/m}^2$ 和 $0 \sim 20.21 \text{ kg/m}^2$,如图 2(d)–(f)所示。各县(市/区)的防风固沙服务需求量变化趋势及时空分布与供给量一致。2007—2023 年各县(市/区)的单位面积年平均防风固沙服务需求量变化均呈正增长。

这种分布情况与研究区的植被覆盖度密切相关^[23-24],气候条件、植被状况和土地利用方式等因素对防风固沙服务指标的供给和需求影响呈正相关^[25]。防风固沙供给量的增加得益于榆林市多年来持续开展防沙治沙工作,实施了一系列生态治理工程,如三北防护林体系建设、天然林保护、退耕还林还草^[26]等。

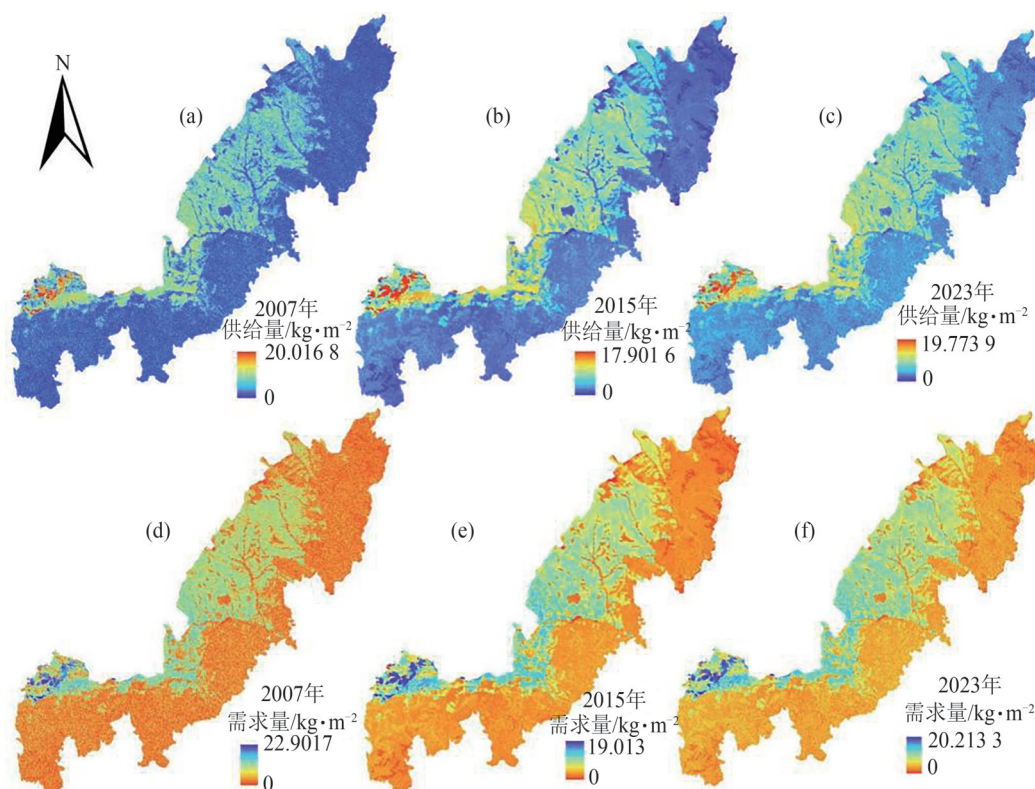


图2 2007、2015、2023年陕北榆林风沙区WS单位面积供给量及需求量空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of WS supply demand in the wind sand area of Yulin, northern Shaanxi in 2007, 2015 and 2023

2.2 防风固沙服务供需比时空特征分析

2007 年、2015 年和 2023 年防风固沙服务供需比值分别介于 $-0.140 \sim 0.023$ 、 $-0.065 \sim 0.011$ 和 $-0.035 \sim 0.015$ 。为更直观地显示研究区的供求关系,利用栅格计算器将防风固沙服务供需比的值先扩大 100 倍,并不会改变其数值的正负,使栅格数据在转整形的过程中能够将供需比值重分类为 3 类:若 $ESDR > 0$, 表现为盈余;若 $ESDR = 0$, 表现为平衡;若 $ESDR < 0$, 表现为赤字。利用 ArcGIS Pro 中的几何属性计算得到研究区 2007—2023 年的防风固沙服务供需比和分类面积占比(表 3)。2007—2015 年陕北榆林风沙区防风固沙服务供给与需求的空间匹配平衡状况大幅度下降,有 17.08% 的生态空间从供需平衡状态转为不平衡,体现在赤字状态增加了 18.33%,盈余状态减少了 1.25%。从人为活动来看,2007—2015 年期间,陕北榆林风沙区的防风固沙服务供需平衡状况大幅下降,主要原因是当时土地开发和资源开采活动较为频繁,对植被造成了一定破坏,导致防风固沙服务供给减少^[27],即自然资源的位置与人口和经济发展之间的空间不匹配^[28]。从自然条件看,该地区属于生态脆弱区,气候干旱、降水稀少且分布不均,风速变化较大,这些自然因素导致防风固沙服务的供给能力存在较大波动^[27]。此外,风蚀因子是影响防风固沙服务的关键因素之一,尤其是在风速较大时,风蚀现象更为明显,进一步削弱了防风固沙服务的供给^[12]。而 2015—2023 年间,研究区生态空间平衡状态又有所恢复,防风固沙服务供需平衡状态增长 7.97%,相应地赤字状态减少 20.19%,盈余状态增加 12%。这期间,随着榆林市大规模开展退耕造林生态修复工程,植被覆盖度明显提高,当地通过建设以乔灌草合理搭配的林草植被,使得防风固沙服务供给能力进一步恢复。2007—2023 年综合来看,陕北榆林风沙区的防风固沙服务生态平衡在弱化。

表 3 陕北榆林风沙区各年 WS 供需比分类面积占比

Tab. 3 The proportion of supply-demand ratio for WS in the wind-sand area of Yulin, northern Shaanxi in each year

年份	ESDR < 0		ESDR = 0		ESDR > 0	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
2007	21 830.992	65.22	9 247.088	27.62	2 395.822	7.16
2015	27 963.803	83.55	3 528.593	10.54	1 979.076	5.91
2023	21 208.896	63.36	6 196.284	18.51	6 070.126	18.13

2.3 防风固沙服务供需风险特征

本文以防风固沙服务供需比和供需均衡度变化趋势来分析研究区防风固沙服务供需风险特征,2007 年及 2023 年防风固沙服务风险特征分布如图 3 所示,2023 年防风固沙服务供需风险相比 2007 年,总体呈下降趋势。其中Ⅰ级供需重度危险区和Ⅱ级供需中等危险区分别下降了 8.2% 和 10.1%,但 2023 年Ⅰ级和Ⅱ级风险总和占比仍高达 59.95%,高风险区域主要集中在研究区西北部,该研究区的防风固沙服务改善仍需得到重视,风沙侵蚀严重、气候干旱、植被覆盖率低、土地沙化加剧以及人口活动压力大等是主要原因。供需平衡及安全三类等级的占比呈增长趋势,2023 年总面积约 19.93% 由Ⅲ级供需平衡区组成,主要得益于大规模植树造林、草地恢复、土地利用结构优化以及生态治理成效显著,同时局部自然条件相对较好。总面积约 10.57% 及 9.54% 分别由Ⅳ级供需中度安全区和Ⅴ级供需高度安全区组成,因为长期生态修复成效显著、生态保护措施完善、自然条件优越等原因,使得这些区域的防风固沙服务供给能力较强,生态系统较为稳定。

2.4 防风固沙服务风险下生态系统服务分布特征

2007、2015、2023 年陕北榆林风沙区水资源供给服务量和土壤保持服务量时空分布如图 4 所示。从时空格局来看,3 个年份水资源供给总量分别为 5.835×10^6 mm、 3.904×10^7 mm 和 3.825×10^7 mm,呈逐年降低的趋势。平均土壤保持量分别为 1 620.715 t/hm²、1 232.023 t/hm² 和 1 427.876 t/hm²,呈先减后增的趋势。从空间格局来看,水资源供给服务量格局总体呈从西北到东南方向增加的趋势,平均供水较多的地区集中在长城沿线。土壤保持服务空间分布格局较为稳定,平均土壤保持量高值区主要在研究区的东南部。分区域来看,水供给总量最多的地区在神木市,总量为 6.816×10^6 mm,最少的地

区在横山区,总量为 2.543×10^6 mm。土壤保持量最多的地区在靖边县,总量为 1.488×10^8 t,最少的地区在榆阳区,总量为 6.171×10^7 t。防风固沙服务量、水资源供给量和土壤保持量在时空分布上基本一致,总体上来说高值区均分布在长城沿线一带。

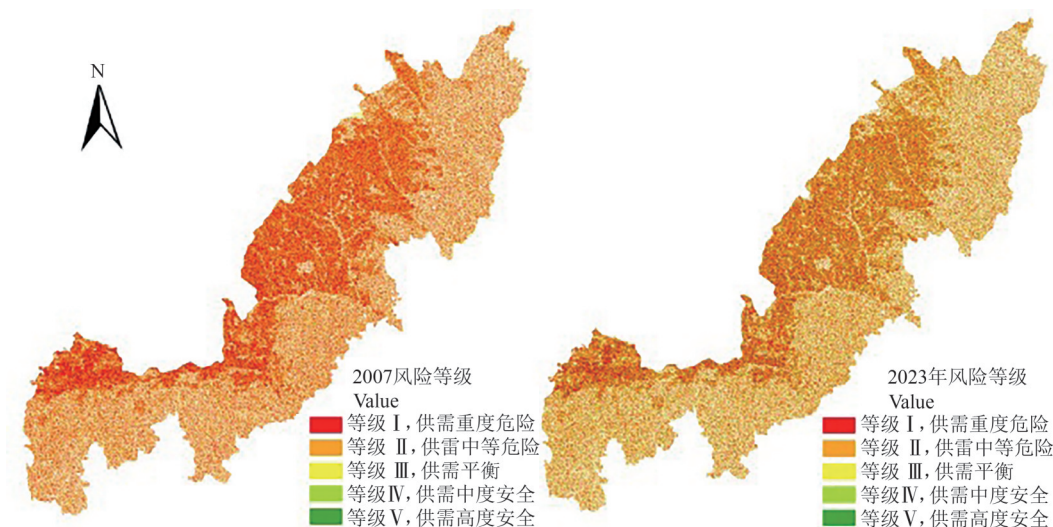


图 3 2007 年及 2023 年防风固沙服务供需风险分布特征
Fig. 3 The distribution characteristics of supply demand risks for windbreak and sand fixation services in 2007 and 2023

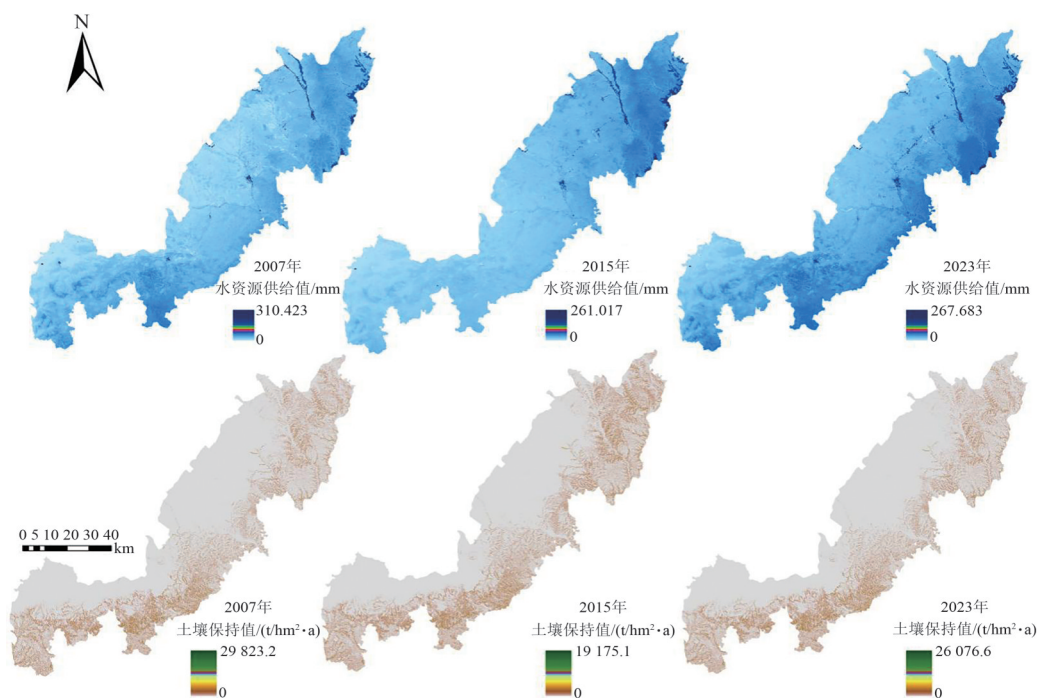


图 4 2007、2015、2023 年陕北榆林风沙区水资源供给服务量和土壤保持服务量
Fig. 4 The water resource supply services and soil conservation services in the wind and sand area of Shaanxi in 2007, 2015 and 2023

标准化水资源供给量和土壤保持服务量如图 5 所示。从时空角度来看,水资源供给服务从 2007 年至 2023 年是下降的,而土壤保持服务的变化趋势较为稳定。从不同防风固沙供需风险来看,随着防风固沙供需风险的降低,水资源供给服务和土壤保持服务均表现出不规则的增加模式,两者都达到 4 级风险峰值,防风固沙服务风险越大,所呈现的水资源供给服务和土壤保持服务量也越低。随着防风固沙供需

风险的降低,总体上两种生态系统服务正向增加,生态会持续向好。这一结果表明,不同防风固沙供需风险会对水资源供给服务和土壤保持服务产生不同程度的影响。植被覆盖度是防风固沙服务、水资源供给服务和土壤保持服务的关键因素,是防风固沙的重要屏障^[29-30],是产生这种影响的主要因素。植被覆盖度越高,防风固沙的效果越好,同时也能更好地保持土壤湿度,减少水土流失,从而提高水资源供给服务和土壤保持服务的质量。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1)造成防风固沙服务供需量变化的影响因素较多。防沙固沙生态工程的持续推进使植被覆盖度逐渐增加,森林生态系统不断恢复和改善,防风固沙效果持续变好,相应地也会减少或抵挡顺风地区沙尘暴的威胁^[31-32]。榆林地区处于干旱半干旱地区,风力作用较强,米朝娟等^[12]的研究揭示了本研究区随着气候变化,风力大小和频率有所变化,进而影响沙地的活动性和防风固沙服务需求量的空间格局。如在风力较大的西北部地区,防风固沙需求量相对更高,促使服务需求呈现西北向东南递减的空间格局。

(2)榆林市多年来一直致力于防沙治沙生态修复工程,效果显著,但陕北榆林风沙区的防风固沙生态系统服务的供需风险较大,两者并不矛盾。植被恢复等生态修复工程影响的是多种生态系统服务^[33],并没有完全作用于防风固沙服务上,生态系统服务间也会产生相互作用。研究区自然环境相对恶劣,风蚀因子显著,风速等不可控气象因素对风蚀影响较大^[25]。虽然 2007—2023 年间防风固沙服务供需危险有所改善,但整体供需缺口仍然存在,针对高风险区域,建议优先实施“乔灌木”混交林建设,结合雨水集蓄工程提升 WP 服务,同时加强土壤保肥措施,促进多生态系统服务协同提升,以应对自然条件的不确定性。另外,高风险区域建议纳入生态保护优先区,管控矿产开发与农业扩张;中等风险区域建议推行生态修复与经济发展平衡策略,为区域“双碳”目标下生态安全保障提供实践路径。尽管研究区长期处于供不应求状态,但持续的生态修复正推动生态系统向供需协调方向发展。

(3)本文研究得到不同防风固沙服务供需风险下的水资源供给服务和土壤保持服务分布不同,未来的研究中可以计算例如碳储存、粮食生产和生物多样性等多种生态系统服务,并探讨不同防风固沙供需风险是否对其他生态系统服务也产生影响。在兼顾防风固沙服务供需现状的同时保护和管理水资源供给服务和土壤保持服务,充分考虑防风固沙服务供需风险的影响,还需要考虑各类生态系统服务之间的相互影响。

3.2 结论

本文分析了陕北榆林风沙区的防风固沙服务供需风险及水资源供给和土壤保持服务,研究结果显示:研究区 2007—2023 年防风固沙服务供给总量和需求总量均呈逐渐递增的趋势。从局部来看,每年单位面积防风固沙服务供给量和需求量均为榆阳区最大,府谷县最小。2007—2023 年防风固沙服务 $ESDR < 0$ 的区域面积占比均超过 60%,供给量小于需求量的区域面积占比仍高,研究区绝大多数区域属于“赤字”状态。从 2007—2023 年,防风固沙服务供需风险总体上呈下降趋势的,但 2023 年高风险区域占比仍高达 59.95%,处于高风险状态,主要集中在研究区西北部。随着防风固沙服务供需风险的降低,不同防风固沙供需风险下对生态系统服务有影响,水资源供给和土壤保持服务呈逐渐增强的

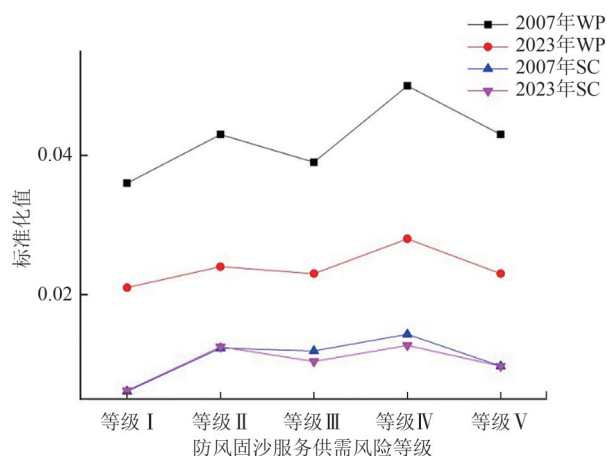


图 5 按风险等级标准化的生态系统服务的多年平均值

Fig. 5 The multi-year average values of ecosystem services standardized by risk level

趋势。

参考文献：

- [1] Calow P. Ecological risk assessment: risk for what? how do we decide?[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1998, 40(1-2): 15-18.
- [2] 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 等. 生态风险评价研究进展[J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1558-1566.
- [3] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 生态风险评价及研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869-1876.
- [4] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [5] Cormier S M, Suter I G W. Revitalizing environmental assessment [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2008, 4(4): 385.
- [6] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R, et al. Ecological risk assessment of urban and industrial systems: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(24): 5162-5176.
- [7] 张玥, 许端阳, 王子玉, 等. 2000—2015年锡林郭勒盟防风固沙服务功能变化驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 603-614.
- [8] Xu J, Xiao Y, Xie G D, et al. How to guarantee the sustainability of the wind prevention and sand fixation service: an ecosystem service flow perspective[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 2995.
- [9] 徐永, 聂浩刚, 冀显坤, 等. 陕北榆林地区植被好转背景下面临的生态环境新挑战[J]. *西北地质*, 2024, 57(5): 308-318.
- [10] 冯宝林. “绿色奇迹”: 榆林治沙问题研究(1949-2015)[D]. 南昌: 江西师范大学, 2019.
- [11] 李慧. “绿进沙退”的中国密码[J]. *绿色中国*, 2020(13): 36-39.
- [12] 米朝娟, 周自翔, 刘婷, 等. 陕北长城沿线植被恢复与生态系统防风固沙服务模拟分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(19): 7884-7897.
- [13] Tian H Z, Wang H, Lyu X, et al. Construction and optimization of ecological security patterns in Dryland watersheds considering ecosystem services flows[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111664.
- [14] 管梦鸾, 张强, 王宝良, 等. 泾河流域水供给服务供需平衡的时空演变与服务流研究[J]. 2022, 13(5): 797-812.
- [15] 韩永伟, 高吉喜, 王宝良, 等. 黄土高原生态功能区土壤保持功能及其价值[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 78-85.
- [16] Marques M J, Bienes R, Jimenez L, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events: rainfall simulation over USLE plots[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(1-2): 161-165.
- [17] Grizzetti B, Lique C, Pistocchi A, et al. Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 452-465.
- [18] Meng Q X, Zhang L K, Wei H J, et al. Linking ecosystem service supply-demand risks and regional spatial management in the Yihe River Basin, Central China[J]. *Land*, 2021, 10(8): 843.
- [19] 白杨, 王敏, 李晖, 等. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J]. *生态学报*, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [20] 刘晶晶, 王静, 戴建旺, 等. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 148-161.
- [21] 朱月华, 侯宗东, 徐彩仙, 等. 基于生态系统服务供需关系的甘肃白龙江流域生态风险识别与管理[J]. *地理科学*, 2023, 43(3): 423-433.
- [22] 樊晓凤. 长江流域生态系统服务供需流量化评估与优化[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [23] 潘婷婷, 张永福. 2000—2018年新疆阿克苏地区防风固沙服务功能时空变化特征[J]. *中南农业科技*, 2024(1): 108-115.
- [24] 朱趁趁, 龚吉蕊, 杨波, 等. 内蒙古荒漠草原防风固沙服务变化及其驱动力[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4606-4617.
- [25] 黄孟冬, 肖玉, 秦克玉, 等. 1980—2018年浑善达克地区防风固沙服务时空变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7612-7629.
- [26] 莫宏伟, 任志远, 李振国. 陕北榆林市土地生态价值及生态风险动态分析[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 189-192.
- [27] 安冬, 邓伟. 基于敏感性分析的生态脆弱区生态安全格局构建: 以陕西省榆林市为例[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(7): 127-131.
- [28] Feng Q, Zhao W W, Duan B L, et al. Coupling trade-offs and supply-demand of ecosystem services (ES): a new opportunity for ES management[J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(4): 275-280.

- [29] 张彪,王爽. 锡林郭勒盟风沙源治理区防风固沙功能变化评估[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 291-299.
- [30] 石智宇,董霁红. 北方干旱半干旱区植被覆盖时空变化及其对生态系统服务的影响[J]. 中国环境科学, 2026,46(1): 379-388.
- [31] 李琦,孙根年,韩亚芬. 植被防风固沙生态功能的时间同步性研究:以榆林市为例[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 94-98.
- [32] Xu J, Xiao Y, Xie G D, et al. Assessment of the benefit diffusion of windbreak and sand fixation service in National Key Ecological Function areas in China[J]. Aeolian Research, 2021, 52: 100728.
- [33] 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.

Ecosystem Service Changes under Different WS Supply-demand Risks: A Case Study of Wind-sandy Area in Yulin, Northern Shaanxi

NIU Miaomiao¹, ZHU Zhimei^{1,2}, DONG Shaoxia¹, CHE Chuanyu¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China)

Abstract: Windbreak and sand fixation (WS) ecosystem services (ESs) were selected to evaluate ecological risks in the wind-sandy area of Yulin, Northern Shaanxi. The RWEQ wind erosion equation model was adopted to quantify the supply and demand quantities of WS ESs in the study area for 2007, 2015 and 2023. The ES supply-demand ratio (ESDR) was calculated to identify the supply-demand balance status of WS ESs across the study area. Additionally, variations in the supply-demand balance degree were combined to evaluate supply-demand risks of WS ESs, and whether WS risks exerted influence on water provision (WP) services and soil conservation (SC) services was explored. The research showed that the total supplies of WS services in the study area for the three years were 1.540×10^7 , 1.898×10^7 , and 2.193×10^7 t, respectively, while the total demand volumes were 2.046×10^7 , 2.165×10^7 , and 2.300×10^7 t, all of which presented the trend of gradually increasing. Spatially, the per-unit-area supply and demand of WS services were the highest in Yuyang District and the lowest in Fugu County in each of the three years. The area proportions of regions with ESDR less than 0 were 65.22%, 83.55%, and 63.36% for the three years. A large share of the study area was characterized by an insufficient supply relative to demand, and most parts of the study area were classified as service “deficit” zones. From 2007 to 2023, the overall WS supply-demand risk presented a declining trend, but high-risk zones still accounted for as high as 59.95% in 2023, which were mainly distributed in the northwest of the study area. As the supply-demand risk of WS services was reduced, WP and SC services were strengthened progressively. The WS ESs in the study area were maintained at a high-risk level, and different WS supply-demand risks exerted distinct influences on ESs.

Key words: RWEQ model; windbreak and sand fixation service; ecosystem services supply and demand; supply-demand risk evaluation

【责任编辑 张颖娟】