

DOI: 10.20103/j.stxb.202302260341

脱登峰, 卢琦, 却晓娥, 程磊磊, 杨岩岩, 高攀, 崔桂鹏. 中国北方草地生态系统服务评估. 生态学报, 2024, 44(2): 455-462.

Tuo D F, Lu Q, Que X E, Cheng L L, Yang Y Y, Gao P, Cui G P. Evaluation of grassland ecosystem services in northern China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(2): 455-462.

中国北方草地生态系统服务评估

脱登峰^{1,2}, 卢琦^{1,2,*}, 却晓娥^{1,2}, 程磊磊^{1,2}, 杨岩岩^{1,2}, 高攀^{1,2}, 崔桂鹏^{1,2}

1 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

2 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

摘要: 北方草地是我国天然草地主体部分, 其生态功能对提升生态系统稳定性、保障国家生态安全具有重要的作用。在北方草地生态功能分区基础上, 开展 2011—2015 年不同功能区内防风固沙、土壤保持、水源涵养等生态功能评估, 探明其现状和空间格局, 为北方草地生态功能分区研究提供评估数据, 也为推进草地生态系统保护与修复工作提供科技支撑。结果表明: (1) 北方草地防风固沙能力为 $32.44 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 防风固沙量为 89.22 亿 t/a 。半干旱草原区防风固沙能力和固沙量最大, 分别为 $68.76 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 29.16 亿 t/a , 其固沙量占北方草地固沙总量的 32.68%。(2) 北方草地土壤保持能力为 $124.5 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 土壤保持量为 243.59 亿 t/a 。土壤保持功能的空间异质性较大, 暖性灌草丛区土壤保持能力最大, 为 $431.52 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 高寒草甸区土壤保持量最多, 为 105.36 亿 t/a , 占北方草地土壤保持总量的 43.19%。(3) 北方草地水源涵养能力为 $93.03 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 水源涵养量为 288.98 亿 m^3/a 。高寒草甸区和高寒草原区水源涵养能力较大, 分别为 $211.09 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $118.04 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。两个区域的水源涵养量也较多, 分别为 125.36 亿 m^3/a 和 72.13 亿 m^3/a , 合占北方草地水源涵养总量的 68.34%。整体上, 北方半干旱草原区、暖性灌草丛区、高寒草甸区和高寒草原区对发挥我国草地防风固沙、土壤保持、水源涵养等生态多功能效益、提升生态系统服务和稳定性具有极其重要的作用。

关键词: 草地生态系统; 生态功能分区; 生态功能评估; 空间格局; 北方地区

Evaluation of grassland ecosystem services in northern China

TUO Dengfeng^{1,2}, LU Qi^{1,2,*}, QUE Xiao'e^{1,2}, CHENG Leilei^{1,2}, YANG Yanyan^{1,2}, GAO Pan^{1,2}, CUI Guipeng^{1,2}

1 Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Northern grassland is the main part of natural grassland in China. Its multiple ecological functions play extremely important role in promoting ecosystem stability and ensuring ecological security in northern China. In this study, based on the grassland ecological function area, we used the revised wind erosion equation (RWEQ), revised universal soil loss equation (RUSLE), and water balance method to evaluate the soil conservation function, sand fixation function, and water conservation function in different grassland ecological function areas of northern China during 2011-2015. The results will provide the assessment data for studying grassland ecological function area, and provide the scientific policies for grassland ecosystem protection and restoration. The results showed that: (1) the values of sand fixation capacity and sand fixation amount in northern grassland ecosystem, were $32.44 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and 8.922 billion t/a , respectively. The highest values, both observed in semi-arid grassland areas, were $68.76 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and 2.916 billion t/a , respectively. The total sand fixation amount in this area contributed 32.68% of the northern China. (2) The values of soil conservation capacity and soil

基金项目: 中国科学院野外站联盟项目课题 (KFJ-SW-YW037-02); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金子项目 (CAFYBB2021MC002); 国家自然科学基金项目 (42207412); 新疆自治区重点研发计划项目课题 (2021B03002-3)

收稿日期: 2023-02-26; 网络出版日期: 2023-06-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luqi@caf.ac.cn

本研究尚未统计到中国港澳台地区数据。

conservation amount in northern grassland ecosystem, were $124.5 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and 24.359 billion t/a , respectively. Soil conservation function presented a great spatial heterogeneity in northern grassland ecosystem. The highest value of soil conservation capacity was $431.52 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, that was observed in warm shrub-grassland area. Moreover, the highest value of soil conservation amount was 10.536 billion t/a , that was observed in alpine meadow area. The total soil conservation amount in this area contributed 43.19% of the northern China. (3) The values of water conservation capacity and water conservation amount in northern grassland ecosystem, were $93.03 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and 28.898 billion m^3/a , respectively. Compare to other areas, the areas of alpine meadow and alpine grassland had higher water conservation capacity, with values of $211.09 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $118.04 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. Simultaneously, the areas of alpine meadow and alpine grassland had greater water conservation amount than other areas, with values of 12.536 billion m^3/a and 7.213 billion m^3/a , respectively, and accounting for 68.34% of the total water conservation amount in northern China. Overall, compare to other areas, the areas of semi-arid grassland, warm shrub-grassland, alpine meadow, and alpine grassland in northern China, which play extremely important role in exerting the multiple ecological functions of soil conservation, sand fixation, and water conservation, and improving the services and stability of northern grassland ecosystem.

Key Words: grassland ecosystem; ecological function area; ecological function assessment; spatial pattern; northern China

草地生态系统是地球上面积仅次于森林的第二大生态系统,世界草地总面积约为 52.5 亿 hm^2 ,占地球陆地总面积的 40.5%(不包括格陵兰岛和南极)^[1]。我国拥有草地面积约 2.65 亿 hm^2 ,占国土总面积的 27.6%(自然资源部三调数据)。草地作为一种重要的自然资源,不仅是畜牧业赖以生存和发展的物质基础,同时可以固定地表土壤,提高土壤抗风蚀和抗水蚀能力,还可以拦蓄降水和调节径流,具有防风固沙、土壤保持、水源涵养等生态功能^[2-4]。

北方草地是我国天然草地的主体部分。根据中国草地分类系统,分布于我国北方的温性草原、高寒草原、草甸和荒漠等类型草地占全国草地总面积的 85%以上^[5]。现阶段我国约有 90%左右的天然草地处于不同程度的退化之中,严重退化草地占 60%以上^[1]。然而,我国重视草地生产功能,忽视草地退化导致其生态功能下降及对生态环境的负面影响^[6-7]。北方草地既是减少我国沙尘暴发生、固沙保土的重要绿色生态屏障,也是黄河、长江、澜沧江等江河的发源地和水源涵养区。北方草地生态功能在保障我国生态安全方面具有重要的战略地位^[1,5]。目前对我国草地生态系统服务的综合评估大多在较小空间尺度开展^[8-9],或者不同学者采用的评估方法不一致^[10-12]。北方草地呈带状从东向西南延绵 4500 km,评估方法的不一致、生态参数和环境的复杂性决定了其生态功能的不确定性和空间异质性^[3]。北方草地生态系统服务现状和空间格局研究仍然具有重要性和紧迫性。

生态功能分区是根据区域生态特征、生态敏感性与生态系统功能的空间分异规律而确定的地域空间单元,可以为区域生态系统保护与管理起到关键的空间指引作用^[13]。我国 20 世纪 90 年代提出了草地资源分区^[14]。然而,该分区以草地资源空间分异规律为依据,未考虑草地生态系统服务和生态功能的重要作用。在山水林田湖草沙系统治理、“美丽草原”建设的国家科技需求下,白永飞等^[5]以草地类型、中国草地资源分区和生态功能分区为基础,综合考虑气候、土壤、植被等重要生态参数、生态系统服务,以及生态敏感性评价,将北方草地划分为 7 个功能区。目前该生态功能分区获得了初级生产力、碳固持功能评估数据,亟需进一步评估其他重要生态功能,这也是科学指导和合理配置草地生态与生产功能的重要依据。

基于此,本文利用气象、土壤、归一化指数 (NDVI)、土地利用等数据,采用修正通用土壤风蚀方程 (RWEQ)、修正水土流失方程 (RUSLE) 及水量平衡法等,开展 2011—2015 年我国北方草地不同功能区内防风固沙、土壤保持、水源涵养等生态功能评估,探明其现状和空间格局。结果为北方草地生态功能分区研究提供数据支撑,也为推进草地生态系统保护与修复工作提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究需要的气象数据来源于中国气象数据网-中国地面气候资料日值数据集(V3.0),雪盖数据来源于中国科学院旱区寒区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>),土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所提供的1:100万土壤数据库,NDVI数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),土地利用、数字高程模型(DEM)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。所有空间数据分辨率为1 km。

草地提取:中国土地利用类型一级分类包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地6类。该分类从土地利用类型遥感监测实用操作性出发,紧密结合全国县级土地利用现状分类系统,可以开展土地覆被遥感监测成果的数据处理。本研究利用多期(2010年、2013年和2015年)土地利用遥感监测数据,提取了高、中、低覆盖度草地栅格,得到了不同时期我国北方草地的分布和面积。

1.2 研究方法

1.2.1 防风固沙功能

本研究利用修正风蚀方程(RWEQ)来估算防风固沙量。计算公式如下:

$$SL = \frac{2z}{s^2} \times Q_{\max} \times e^{-\left(\frac{z}{s}\right)^2} \quad (1)$$

$$Q_{\max} = 109.8 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) \quad (2)$$

$$s = 105.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C)^{-0.3711} \quad (3)$$

式中, SL 为土壤风蚀模数(kg/m^2); z 表示下风向距离(m),本次计算取50 m; s 表示关键地块长度(m); $Q_{\max}$ 为风力的最大输沙能力(kg/m); WF 为气候因子(kg/m),数据处理及计算方法见巩国丽^[15]; EF 和 SCF 为土壤可蚀性因子和土壤结皮因子,计算方法见Fryrear等^[16]; K' 为土壤糙度因子,计算方法见Saleh^[17]; C 为植被因子,计算方法见巩国丽^[15]。草地生态系统防风固沙量为裸土条件下潜在土壤风蚀量与覆被条件下现实土壤风蚀量的差值。

1.2.2 土壤保持功能

本研究利用修正通用水土流失方程(RUSLE)来估算土壤保持量^[18]。计算公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (4)$$

式中, A_c 为土壤保持量($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); A_p 为潜在土壤侵蚀量; A_r 为实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$),通过逐日侵蚀性降雨量数据计算,数据处理及计算方法见Xie等^[19]; K 为土壤可蚀性因子($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$),数据来源于国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心; LS 为坡长坡度因子,计算方法见McCool等^[20]和Liu等^[21]; C 为植被覆盖因子,计算方法见Rao等^[22]; P 为水土保持措施因子,草地生态系统赋值为1。

1.2.3 水源涵养功能

草地生态系统水源涵养量通过水量平衡法来估算。水量平衡法是将生态系统视为一个“黑箱”,考虑水量的输入和输出,从水量平衡角度,降水量与蒸散量以及地表径流量的差即为水源涵养量^[23]。计算公式如下:

$$Q_{WT} = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \quad (5)$$

式中, Q_{WT} 为水源涵养量(m^3); P_i 为降雨量(mm); R_i 为地表径流量(mm); ET_i 为蒸散发(mm); A_i 为*i*类生态系统的面积;*i*为研究区第*i*类生态系统类型;*j*为研究区生态系统类型数(此次计算只包括草地生态系统,*j*为1)。地表径流量为降雨量与地表径流系数的乘积。地表径流系数主要通过查阅文献资料获得,包括公开发表的文献、论文和出版专著上关于草地的地表径流数据^[11,24-31]。具体数值见表1。

2 结果与分析

2.1 防风固沙功能特征

2011—2015 年,北方草地防风固沙能力为 $32.44 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。防风固沙能力较大的区域为半干旱草原区(Ⅱ)和湿润半湿润草甸草原与草甸区(Ⅰ),分别为 $68.76 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $45.35 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;最小的区域为高寒草甸区(Ⅴ),为 $10.20 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 1,图 2)。北方草地防风固沙量为 89.22 亿 t/a 。固沙区域主要分布在半干旱草原区(Ⅱ)和高寒草原区(Ⅵ),固沙量分别为 29.16 亿 t/a 和 22.12 亿 t/a ,占北方草地固沙总量的 32.68% 和 24.79%。暖性灌草丛区(Ⅲ)固沙量最少,为 0.84 亿 t/a ,仅占北方草地固沙总量的 0.94%(图 2)。

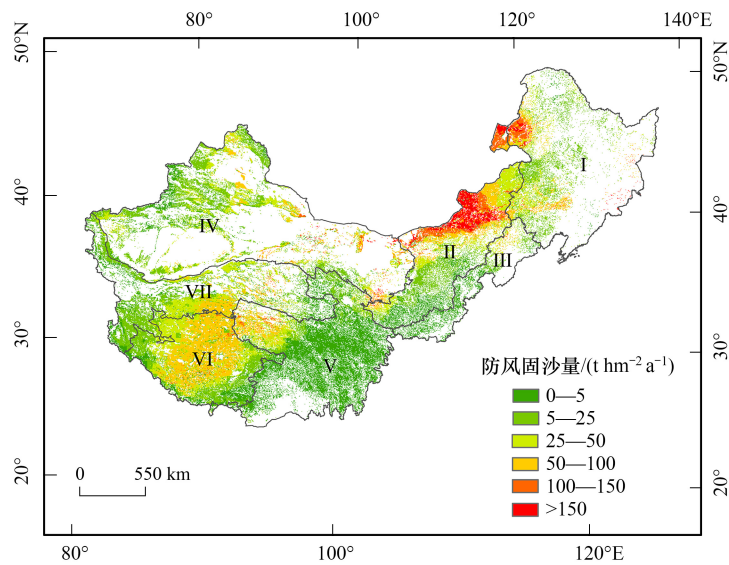


图 1 北方草地生态系统防风固沙量空间分布

Fig.1 Spatial pattern of sand fixation in grassland ecosystem of northern China

Ⅰ:湿润半湿润草甸草原与草甸区;Ⅱ:半干旱草原区;Ⅲ:暖性灌草丛区;Ⅳ:干旱荒漠-绿洲-山地草地区;Ⅴ:高寒草甸区;Ⅵ:高寒草原区;Ⅶ:高寒荒漠区

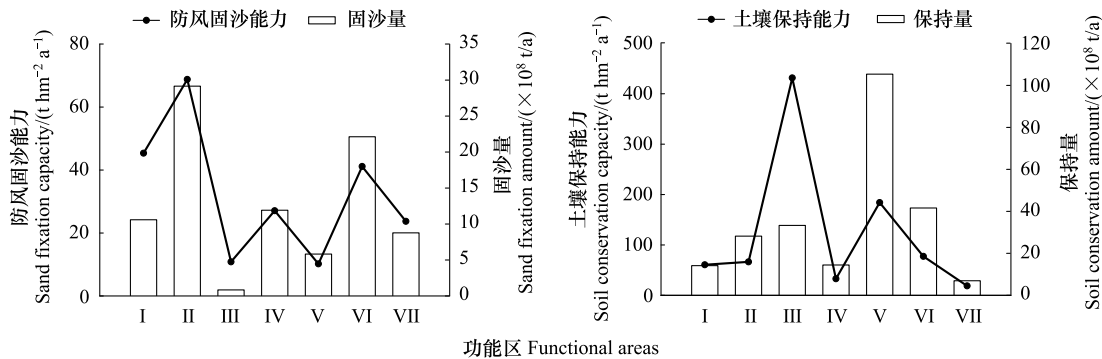


图 2 北方草地生态系统不同功能区防风固沙和土壤保持功能

Fig.2 The functions of sand fixation and soil conservation under grassland ecosystem in different ecological functional areas of northern China

2.2 土壤保持功能特征

2011—2015 年,北方草地土壤保持能力为 $124.5 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。土壤保持能力最大的区域为暖性灌草丛区(Ⅲ),为 $431.52 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;最小的区域为高寒荒漠区(Ⅶ),为 $18.71 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (图 2,图 3)。北方草地土壤保持量为 243.59 亿 t/a 。高寒草甸区(Ⅴ)、高寒草原区(Ⅵ)和暖性灌草丛区(Ⅲ)土壤保持量较多,分别为

105.36 亿 t/a、41.60 亿 t/a 和 33.30 亿 t/a, 占北方草地保土总量的 43.19%、17.05% 和 13.65%; 高寒荒漠区 (Ⅶ) 土壤保持量最少, 为 6.93 亿 t/a, 仅占北方草地保土总量的 2.85% (图 2)。

2.3 水源涵养功能特征

2.3.1 地表径流系数

北方草地生态系统地表径流系数(a)以各功能分区获取数据的均值表示。结果发现(表 1), 高寒草甸区 (Ⅴ) a 值最高, 为 20.14%, 其次依次为半干旱草原区(Ⅱ, 14.57%)、暖性灌草丛区(Ⅲ, 12.4%)、湿润半湿润草甸草原与草甸区(Ⅰ, 10.41%) 和高寒草原区(Ⅵ, 6.54%)。高寒荒漠区(Ⅶ)降水量少、蒸散发量高、土壤干燥、植被覆盖度也较低, 地表产流接近于无, a 值取为 0。

2.3.2 水源涵养量

2011—2015 年, 北方草地水源涵养能力为 $93.03\text{ m}^3\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。水源涵养能力较大的区域为高寒草甸区 (Ⅴ) 和高寒草原区(Ⅵ), 分别为 $211.09\text{ m}^3\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 和 $118.04\text{ m}^3\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$; 最小的区域为干旱荒漠-绿洲-山地草地区(Ⅳ), 为 $35.43\text{ m}^3\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ (图 4, 表 1)。北方草地水源涵养量为 $288.98\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。高寒草甸区(Ⅴ) 和高寒草原区(Ⅵ) 水源涵养量较多, 分别为 $125.36\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 和 $72.13\text{ 亿 m}^3/\text{a}$, 占北方草地水源涵养总量的 43.38% 和 24.96%; 暖性灌草丛区(Ⅲ) 水源涵养量最少, 为 $6.78\text{ 亿 m}^3/\text{a}$, 仅占北方草地水源涵养总量的 2.35% (表 1)。

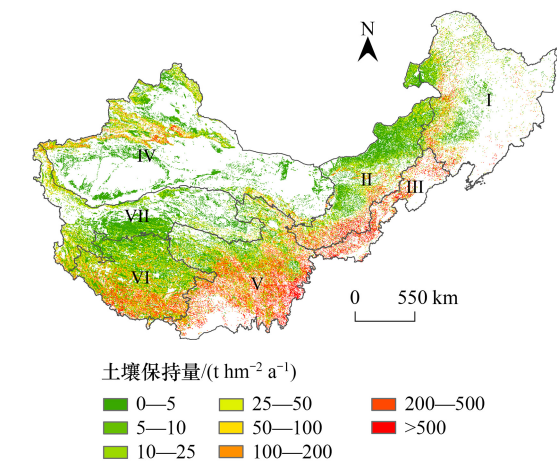


图 3 北方草地生态系统土壤保持量空间分布
Fig.3 Spatial pattern of soil conservation in grassland ecosystem of northern China

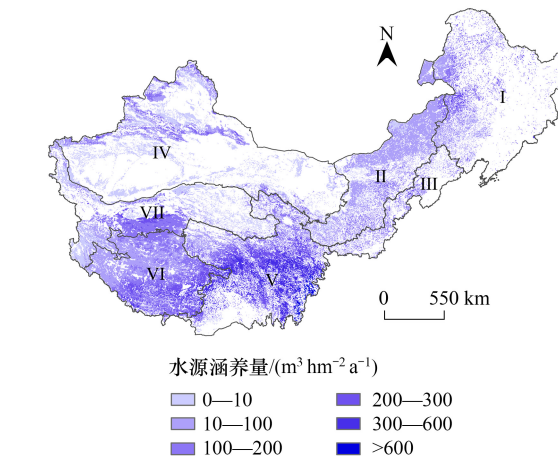


图 4 北方草地生态系统水源涵养量空间分布
Fig.4 Spatial pattern of water conservation in grassland ecosystem of northern China

表 1 北方草地生态系统不同功能区地表径流系数和水源涵养功能

Table 1 The runoff coefficient and water conservation function under grassland ecosystem in different ecological functional areas of northern China

编号 Number	功能区 Functional area	地表径流系数 Runoff coefficient/%	水源涵养 Water conservation		
			水源涵养能力 Water conservation capacity/ ($\text{m}^3\text{ hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$)	水源涵养量 Water conservation amount/ ($10^8\text{ m}^3/\text{a}$)	占比 Ration/%
I	湿润半湿润草甸草原与草甸区	10.41	92.07	21.87	7.57
II	半干旱草原区	14.57	47.31	20.12	6.96
III	暖性灌草丛区	12.40	87.72	6.78	2.35
IV	干旱荒漠-绿洲-山地草地区	3.44	35.43	17.28	5.98
V	高寒草甸区	20.14	211.09	125.36	43.38
VI	高寒草原区	6.54	118.04	72.13	24.96
VII	高寒荒漠区	0	59.57	25.44	8.80
	合计		93.03	288.98	100

3 讨论

3.1 北方草地生态系统不同生态功能

草地不仅具有重要的畜牧业生产功能,也具有防风固沙、土壤保持、水源涵养等极其重要的生态功能。现阶段一些学者对我国草地防风固沙功能进行了评估。例如,江凌等^[32]估算 2000—2010 年内蒙古草地防风固沙量为 57.6 亿 t/a。王洋洋等^[33]估算 2000—2015 年宁夏草地防风固沙量为 7.30×10^6 — 41.20×10^6 t/a。赵同谦等^[11]指出,2004 年中国北方草地固沙量约为 42.73 亿 t。其中,温性草原固沙量最多(17.07 亿 t),其次为低地草甸(9.16 亿 t)和温性荒漠草原(7.99 亿 t)。利用 RWEQ 模型,本研究得出北方草地 2011—2015 年防风固沙量为 89.22 亿 t/a。与上述研究结果相比,近 10 年我国北方草地防风固沙量增加了约 1 倍。此外,我国草地土壤保持功能评估也取得了一定的成果。例如,Sun 等^[34]估算 1984—2013 年青藏高原草地土壤保持量为 2.72×10^7 t/a。孙文义等^[9]估算 2000—2010 年黄土高原草地土壤保持量为 7.6×10^9 t/a。赵同谦等^[11]估算 2004 年中国草地土壤保持量为 144.34 亿 t。刘洋洋等^[10]估算 2000—2016 年中国草地土壤保持量为 118 亿 t/a。利用 RUSLE 模型,本研究得出 2011—2015 年北方草地土壤保持量为 24.4×10^9 t/a。研究发现,不同学者估算的草地防风固沙和土壤保持功能物质质量存在差异,造成这种差异的原因在于研究时间段、研究范围、评价方法存在差异。总体上,基于大尺度空间范围,本研究结果将为我国草地防风固沙和土壤保持功能评估提供重要数据支撑。

草地水源涵养功能研究从早期对径流的调节到现在关注降水拦蓄和涵养水源,并取得了一定的成果。刘洋洋等^[10]估算 2000—2016 年中国草地水源涵养量为 2580 亿 m^3 /a。龚诗涵等^[35]估算 2010 年中国草地水源涵养量为 1912.54 亿 m^3 ,占中国生态系统水源涵养总量的 15.65%。吴丹等^[30]则估算 2000—2010 年中国草地水源涵养量为 1183.8 亿 m^3 /a,其中北方草地为 409.3 亿 m^3 /a。本研究得出,我国北方草地 2011—2015 年水源涵养量为 289.32 亿 m^3 /a,比前人结果略低,造成这种差异的原因除研究时段不同外,可能是地表径流系数的影响。地表径流系数是利用水量平衡法估算草地水源涵养量的重要参数,主要通过查阅文献资料获得,包括出版专著、学位论文和期刊文献上关于草地及试验小区的降水、径流数据,其数据的准确性存在一定主观影响。本研究在前人诸多研究的基础上,对地表径流系数数据进行更详细的统计和校准。因此,研究结果具有一定的代表性。

3.2 北方草地不同功能分区内生态功能

北方草地呈带状从东向西南延绵分布,其生态环境的复杂性和敏感性决定了其功能的重要性随地域变化存在空间异质性^[3]。研究发现,半干旱草原区温度高、蒸发量大,是西北风的主要通道,极易受到风蚀影响,同时较好地地表覆被导致了区域的固沙效果较为明显,防风固沙量贡献了北方草地固沙总量的 32.68%。另外,暖性灌草丛区、高寒草甸区和高寒草原区较好的植被覆盖,较大的土壤保持能力也是维持较高土壤保持量的重要因素,三个区域贡献了北方草地土壤保持总量的 73.89%。北方草地水源涵养量呈现西南高北方低、由东到西逐渐递减特征,主要水源涵养区位于青藏高原和内蒙古高原中东部区域。高寒草甸区和高寒草原区的水源涵养能力较大,两区域水源涵养量占北方草地水源涵养总量的 68.34%,与前人的研究结果基本一致。于格等^[36]研究得出,青藏高原天然草地一个生长季提供的土壤水分保持量约为 604.48 亿 t,高寒草原和高寒草甸分别贡献 33.32%和 30.3%,合计贡献 63.62%。该区域草地对降雨的较高渗透率是影响水源涵养量的重要因素。贺有龙等^[37]指出仅青海的高寒草原类和高寒草甸类草地,每年渗透到土壤中的降水约有 200 亿 m^3 。总体上,北方半干旱草原区防风固沙功能较高,暖性灌草丛区土壤保持功能较高,高寒草甸区和高寒草原区水源涵养和土壤保持功能较高,这些区域对我国草地生态多功能效益和生态系统稳定性的提升发挥着重要作用。

3.3 存在问题与保护对策

本文主要目的是摸清我国北方草地生态功能本底值,因而研究的时间尺度较小。不同生态功能年际变化不明显,这主要受风速和降水年际多变性影响,植被因子也难以在较小时间段有明显变化。总体上,过去 20

年间,在“退牧还草”“天然草原保护”“草原监测预警”等重大生态工程下,我国草地整体生态质量得以大幅度提高。但同时人类活动影响(超载放牧、开垦)和草原管理水平落后对草地资源造成了较大压力,部分区域草地的利用程度远超过保护管理和恢复速率,草地退化问题依旧存在^[5-6]。黄麟等^[38]指出,2000—2010年间我国防风固沙型、土壤保持型、水源涵养型等重点生态功能区的草地面积分别减少了 2089 km²、393.6×10⁴ km²和 1300 km²。草地生态功能也呈下降趋势,仅在阴山北麓、浑善达克和科尔沁等区域的防风固沙量年降幅超过 2.5 t/hm²,在阿尔金西南部、阴山北麓西部等区域的土壤保持量年降幅也达到 1—2 t/hm²^[39]。现阶段在统筹山水林田湖草沙系统治理、“美丽草原”建设的国家重大科技需求下,为提升草地生态功能,亟需继续加大草地保护和管理力度。在应对措施上,半干旱草原区应坚持“生态优先、绿色发展”的原则,严格限制超载放牧,实施轻放牧和适度放牧,加速恢复沙化、退化的草地^[40]。暖性灌草丛区应加大坡耕地退耕还草、还林,因地制宜、科学配置草本植被在恢复中的比例,有效控制水土流失^[5]。高寒草甸区和高寒草原区应严格实施草畜平衡制度,建立以国家公园为主体的自然保护地体系,保护重要河流上游和重要水源补给区的植被,不断恢复并扩大水源涵养能力和涵养空间^[30]。同时,提升农牧民、游客对草地生态系统服务的重要性认知,也对推动草地生态保护以及居民生计可持续发展具有积极的影响^[41]。

4 结论

本文采用 RWEQ 模型、RUSLE 模型及水量平衡法,评估了 2011—2015 年我国北方草地生态系统不同功能区内防风固沙、土壤保持、水源涵养等生态功能,探明了其现状和空间格局。主要结论如下:

(1) 北方草地防风固沙能力为 32.44 t hm⁻² a⁻¹,防风固沙量为 89.22 亿 t/a。半干旱草原区防风固沙能力和固沙量最大,分别为 68.76 t hm⁻² a⁻¹和 29.16 亿 t/a,其固沙量占北方草地固沙总量的 32.68%。

(2) 北方草地土壤保持能力为 124.5 t hm⁻² a⁻¹,土壤保持量为 243.59 亿 t/a。北方草地土壤保持功能的空间异质性较大。暖性灌草丛区土壤保持能力最大,为 431.52 t hm⁻² a⁻¹;高寒草甸区土壤保持量最多,为 105.36 亿 t/a,占北方草地土壤保持总量的 43.19%。

(3) 北方草地水源涵养能力为 93.03 m³ hm⁻² a⁻¹,水源涵养量为 288.98 亿 m³/a。高寒草甸区和高寒草原区水源涵养能力较大,水源涵养量也较多。两者水源涵养量分别为 125.36 亿 m³/a 和 72.13 亿 m³/a,合占北方草地水源涵养总量的 68.34%。

整体上,北方半干旱草原区防风固沙功能较高,暖性灌草丛区土壤保持功能较高,高寒草甸区和高寒草原区水源涵养和土壤保持功能较高,这些区域对发挥我国北方草地的生态多功能效益、提升生态系统稳定性具有重要的作用。

参考文献 (References):

- [1] 白永飞, 黄建辉, 郑淑霞, 潘庆民, 张丽霞, 周华坤, 徐海量, 李玉霖, 马健. 草地和荒漠生态系统服务功能的形成与调控机制. 植物生态学报, 2014, 38(2): 93-102.
- [2] Liu H F, Hou L L, Kang N N, Nan Z B, Huang J K. A meta-regression analysis of the economic value of grassland ecosystem services in China. Ecological Indicators, 2022, 138(6): 108793.
- [3] 李建东, 方精云. 中国草原的生态功能研究. 北京: 科学出版社, 2017: 5-6.
- [4] 刘洋洋, 任涵玉, 周荣磊, 巴桑参木决, 张伟, 章钊颖, 温仲明. 中国草地生态系统服务价值估算及其动态分析. 草地学报, 2021, 29(7): 1522-1532.
- [5] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 周楷玲. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 675-689.
- [6] 潘庆民, 孙佳美, 杨元合, 刘伟, 李昂, 彭云峰, 薛建国, 夏昊, 黄建辉. 我国草原恢复与保护的问题与对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 666-674.
- [7] 祝萍, 刘鑫, 郑瑜晗, 王世豪, 黄麟. 北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2020, 40(23): 8694-8706.
- [8] 姜佩卿, 付波霖, 刘海新, 高二涛, 范冬林, 唐廷元, 林星辰. 锡林郭勒盟草地生态系统服务功能价值动态估算. 生态学报, 2019, 39

- (11): 3837-3849.
- [9] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价. 自然资源学报, 2014, 29(3): 365-376.
- [10] 刘洋洋, 任涵玉, 周荣磊, 巴桑参木决, 张伟, 章钊颖, 温仲明. 中国草地生态系统服务价值估算及其动态分析. 草地学报, 2021, 29(7): 1522-1532.
- [11] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [12] 仲俊涛, 王蓓, 米文宝, 樊新刚, 杨美玲, 杨显明. 农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系. 农业工程学报, 2020, 36(12): 268-275.
- [13] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. 生态学报, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [14] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 405-500.
- [15] 巩国丽. 中国北方土壤风蚀时空变化特征及影响因素分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [16] Fryrear D, Bilbro J D, Saleh A, Schomberg H, Stout J, Zobeck T. RWEQ: improved wind erosion technology. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55: 183-189.
- [17] Saleh A. Soil roughness measurement: chain method. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 48(6): 527-529.
- [18] Renard K, Foster G R, Weesies G, McCool D, Yoder D. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agriculture Handbook. Washington D C, 1997.
- [19] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, Nearing M A, Zhao Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. Journal of Hydrology, 2016, 535: 547-558.
- [20] McCool D K, Brown L C, Foster G R, Mutchler C K, Meyer L D. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [21] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [22] Rao E M, Ouyang Z Y, Yu X X, Xiao Y. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China. Geomorphology, 2014, 207: 64-70.
- [23] Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q Y, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. Science, 2016, 352: 1455-1459.
- [24] 陈祥伟. 嫩江上游流域生态系统水量平衡的研究. 应用生态学报, 2001, 12(6): 903-907.
- [25] 高麟. 黄丘 5 副区复兴流域不同治理措施的产流产沙规律. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 123-126.
- [26] 江青龙, 谢永生, 赵婷, 张应龙. 冀北山区不同土地利用类型的坡面产流产沙与降雨的关系研究. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 202-207.
- [27] 刘国华. 黑河上游典型草地土壤水分与产流入渗特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [28] 王大庆. 新疆天池自然保护区产流产沙试验研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.
- [29] Wang S P, Zhang Z Q, McVicar T R, Zhang J J, Zhu J Z, Guo J T. An event-based approach to understanding the hydrological impacts of different land uses in semi-arid catchments. Journal of Hydrology, 2012, 416/417: 50-59.
- [30] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 曹巍. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化. 水土保持研究, 2016, 23(5): 256-260.
- [31] 朱宝文, 陈晓光, 郑有飞, 李英年. 青海湖北岸天然草地小尺度地表径流与降水关系. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1074-1079.
- [32] 江凌, 肖燧, 饶恩明, 王莉雁, 欧阳志云. 内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响. 生态学报, 2016, 36(12): 3734-3747.
- [33] 王洋洋, 肖玉, 谢高地, 徐洁. 基于 RWEQ 的宁夏草地防风固沙服务评估. 资源科学, 2019, 41(5): 980-991.
- [34] Sun X H, Zhang D M, Wan H, Chen T T, Yan F J. Analysis of coupling between soil and water conservation and economic-social development. Chinese Journal of Population Resources and Environment, 2009, 7(1): 76-81.
- [35] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖燧, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [36] 于格, 鲁春霞, 谢高地, 郭广猛. 基于 RS 和 GIS 的青藏高原草地生态系统土壤水分保持功能及其经济价值评估——以生长季为例. 山地学报, 2006, 24(4): 498-503.
- [37] 贺有龙, 辛玉春, 杜铁瑛. 论青海天然草地资源的主体功能. 青海草业, 2013, 22(2): 53-56.
- [38] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 巩国丽, 赵国松. 2000—2010 年我国重点生态功能区生态系统变化状况. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2758-2766.
- [39] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 王洋洋, 江源, 陈文辉. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873.
- [40] Li M Y, Li X B, Liu S Y, Li X, Lyu X, Dang D L, Dou H S. Ecosystem services under different grazing intensities in typical grasslands in Inner Mongolia and their relationships. Global Ecology and Conservation, 2021, 26: e01526.
- [41] 胡继然, 姚娟. 基于草地生态系统服务认知的牧民生计选择——以新疆喀拉峻天山世界自然遗产地为. 生态学报, 2022, 42(16): 6534-6542.