

卢建男,李玉强,赵学勇,等.半干旱区典型沙地生态环境演变特征及沙漠化防治建议[J].中国沙漠,2024,44(4):284-292.

# 半干旱区典型沙地生态环境演变特征及 沙漠化防治建议

卢建男<sup>1</sup>,李玉强<sup>1,2</sup>,赵学勇<sup>1</sup>,李宝成<sup>3</sup>,王旭洋<sup>1,2</sup>,张蕊<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室/奈曼沙漠化研究站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.奈曼旗大柳树国有治沙林场,内蒙古 奈曼旗 028300)

**摘要:**沙地作为陆地生态系统重要组成,具有独特的结构和功能。中国北方半干旱、半湿润区的农牧交错带沙地生态环境经历了快速的人类活动正负向干扰过程,集中体现在“破坏利用”和“保护恢复利用”两个阶段。粗放式发展模式引发了一系列诸如土地沙漠化、水资源过度利用及生态失衡等问题。选取科尔沁沙地、毛乌素沙地、浑善达克沙地及呼伦贝尔沙地(四大沙地)作为研究对象,梳理了半干旱区典型沙地自然要素的地域分异特征、沙漠化土地时空演变过程及其驱动力、植被-土壤特征协同演变等方面的文献和研究成果;根据气候变化和人类活动影响下脆弱生态系统土地沙漠化态势及其治理现状认为,未来亟须在政策主导下的沙区人地关系协调发展和基于区域水量平衡的生态恢复及植被稳定性等方面加强研究,科学推进科尔沁、浑善达克两大沙地歼灭战等重点生态工程建设,促进半干旱沙区生态-经济-社会的可持续发展。

**关键词:**半干旱区;沙地;自然要素;沙漠化;生态治理

**文章编号:** 1000-694X(2024)04-284-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00096

**中图分类号:** X196

**文献标志码:** A

## 0 引言

荒漠化指包括气候变异和人类活动在内的各种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱地区的土地退化<sup>[1]</sup>。其中,沙漠化是荒漠化的主要类型,具体表现为沙质荒漠化或风蚀荒漠化。土地沙漠化不仅减少了可利用土地资源,还导致土壤质量下降、农牧业减产及生态失衡<sup>[2-4]</sup>,严重阻碍社会、经济和生态的可持续发展,是中国土地资源面临的主要威胁。中国北方中东部农牧交错地区的原始自然景观为荒漠草原、干草原和疏林草原,农业与牧业并存,是沙漠化发展和逆转的主要区域<sup>[5-6]</sup>;毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地及呼伦贝尔沙地(四大沙地)在农牧交错区呈隐域性分布<sup>[7]</sup>,主要受到风蚀作用影响,沙漠化土地约占中国北方沙漠化土地总面积的48%<sup>[8]</sup>;现代沙漠化过程大体可分为沙丘活化、草原灌丛化、土层风蚀粗化及风蚀劣地形

成<sup>[5]</sup>。由于沙基质的不稳定性,风沙活动频繁,沙地生态系统稳定性较差,容易发生不同程度的退化,成为对全球气候变化和人类活动响应敏感的地区<sup>[9]</sup>。

自1978年以来,中国陆续实施了“三北”防护林建设、退耕还林还草、京津风沙源治理等重点生态工程,积极应对北方农牧交错带的防沙治沙需求。沙漠科学工作者开展了中国北方干旱、半干旱与半湿润地区沙漠化过程及成因<sup>[10-12]</sup>,沙漠化的生物过程与植被恢复机理<sup>[13-15]</sup>,灌草方格沙障、生物结皮及低覆盖度综合治沙等固沙技术与模式的集成研究<sup>[5,16-17]</sup>,极大推动了中国北方沙漠化防治工作,到2010年,中国北方沙漠化土地整体扩展的趋势已经得到有效遏制<sup>[18]</sup>。四大沙地的沙漠化土地面积变化趋势大体一致:均以2000年左右为转折点<sup>[19]</sup>,呈现快速增长到缓慢降低的趋势<sup>[8,20-21]</sup>。2000—2019

收稿日期:2024-05-27; 改回日期:2024-07-13

资助项目:国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20232948);国家自然科学基金项目(31971466,32001214);内蒙古自治区科技成果转化项目(2021CG0012)

作者简介:卢建男(1991—),男,甘肃通渭人,博士,主要从事恢复生态学研究。E-mail: lujnmooc@lzb.ac.cn

通信作者:李玉强(E-mail: liyq@lzb.ac.cn)

年,四大沙地的植被覆盖整体呈现改善趋势<sup>[22-23]</sup>,植被固碳量累计净增加0.94亿t,土壤风蚀量减少1.86亿t<sup>[24]</sup>。

尽管中国沙化土地治理取得了“整体好转、改善加速”的成效,但沙地脆弱生态环境的基本属性没有根本改变,沙漠化地区植被总体上仍处于“人沙对峙”的初步恢复阶段,自我调节能力较弱。传统的沙化土地防治主要通过生物、工程等措施来固定沙质地表、增加植被盖度,忽视了对土壤和水文等要素的改善<sup>[18]</sup>。近年来,北方半干旱区沙地面临固定和半固定沙丘活化<sup>[25-26]</sup>,大量固沙植被陆续衰退或枯死<sup>[27-28]</sup>、沙化土地开垦突增<sup>[29]</sup>、湖泊萎缩、干涸及局地地下水位下降<sup>[30-33]</sup>、土壤水分状况恶化<sup>[34]</sup>等问题,反映出我们对气候变化、人地关系协调、区域水资源承载力变化及固沙树种适应性认识不足。正确认识中国北方农牧交错带典型沙地的自然特征、沙漠化格局、动态和机理,才能因地制宜地进行沙漠化土地恢复重建,甚至改造利用沙地。

## 1 半干旱区典型沙地自然要素特征

特定的气候、土壤和地形条件发育了不同的植物群落;区域生态本底,是生态恢复和生态建设以及制定区域土地利用政策的重要依据<sup>[35]</sup>。中国四大沙地古土壤发育、水热条件、植被覆盖、人口密度的空间异质性问题比较突出<sup>[36]</sup>。各沙地的年降水量为200~500 mm,并表现出强烈的年际和年内变化;植被组成通常以地带性的草本层植物为主,灌木和半灌木广泛分布;土壤由东向西也表现出显著的地带性特点。不同沙区也存在较多的共性特征,表现为均以沙质土壤为主,生态系统类型相近,浑善达克、科尔沁沙地和毛乌素沙地均处于温带半干旱区,为半干旱气候下森林-草原-荒漠过渡地带,植物区系亲缘关系比较近;地貌特征(固定沙丘、半固定沙丘、流动沙丘、丘间地镶嵌分布)类似;年蒸发量高、春季多风,干旱、水土流失、土地沙化、退化(过度利用)等问题严重。1959—2019年,毛乌素沙地区域气候向暖湿化趋势发展<sup>[37-38]</sup>;1956—2016年,浑善达克沙地<sup>[39-41]</sup>和科尔沁沙地<sup>[42-44]</sup>气候均呈暖干化趋势;各沙地整体风速呈下降趋势。

根据2017—2020年内蒙古中东部半干旱荒漠主要植物群落调查(植被类型数据来自于国家冰川冻土沙漠科学数据中心, <http://www.ncdc.ac.cn>)<sup>[35]</sup>,四大沙地现存植被类型与《1:100万中国植被图》<sup>[45]</sup>

中标记的植被类型相差较大,变化的方向主要从沙蓬、虫实等沙地先锋植物群落向黑沙蒿灌丛或柠条锦鸡儿灌丛、小叶锦鸡儿灌丛及榆树群落转变,表明近30年来沙地总体上得以固定,沙地植被覆盖转好,改变的原因主要与不同沙区植被修复过程中飞播造林、人工造林等有关。本文初步总结了北方农牧交错带四大沙地的自然要素特征(表1),根据各沙地自然条件等实际情况,阐明区域的植被特征和分布格局的环境解释,选择与其生理生态相适应的植物种类,是区域防沙治沙的基础支撑和依据。

## 2 半干旱区沙地沙漠化演变特征

土地沙漠化加剧以及生物多样性锐减等环境问题制约着人类社会的生存和发展。通过高分辨率的古环境重建评估中国北方沙地历史演化机制,对预测未来环境变化下的沙地演变规律至关重要。不同的自然地带或同一自然地带内,沙漠化土地分布、发展趋势,土地利用方式和强度,资源开发方向不同<sup>[16]</sup>。沙漠化研究时空尺度、遥感信息源、类型等级划分标准、自然因素/人为因素等指标选取方面的差异,导致四大沙地沙漠化空间分布及驱动因子等统计结果存在差异,但在时间序列上反映出的沙漠化发生与逆转阶段大体一致。

### 2.1 半干旱区沙地形成原因

第四纪以来,中国半干旱和半湿润地区的沙漠化在不同时期、不同时间尺度的成因是有差异的<sup>[3]</sup>,学术界一直存在自然因素、人类活动及二者共同主导作用的争议,究其原因主要是对地质历史时期形成的沙漠(地)算不算沙漠化土地存在分歧<sup>[12,46]</sup>。沙地地层剖面中出现的风成砂-古土壤序列沉积,记录了沙漠发生、发展变化的地质过程。通过对古土壤的孢粉分析和<sup>14</sup>C测年分析,已然揭示半干旱区沙地环境在全新世经历了多次流沙发生、扩展与缩小、固定成壤相交替的波动式发展过程<sup>[47-51]</sup>。太阳辐射强度控制的亚洲季风环流和有效湿度变化影响沙地演化过程<sup>[52]</sup>,且各沙地内部的古土壤发育也具有高度的空间异质性<sup>[36]</sup>。Yang等<sup>[53]</sup>研究认为全新世中晚期地下水减少是引起浑善达克沙地不可逆荒漠化的原因,即使开展大规模的重建工程也不可能恢复成绿洲状态。自然因素对荒漠化的影响时间尺度上表现为万年或千年<sup>[10,54]</sup>。

表 1 北方农牧交错带四大沙地自然要素特征

Table 1 Statistics of natural elements of typical sandy lands in the agro-pastoral transition zone of northern China

| 沙地名称   | 地理位置及沙源                                | 风沙地貌特征   | 面积/km <sup>2</sup>                              | 气候特征  | 植被概况   | 土壤概况  |
|--------|--|--|---|---|--|---|
| 科尔沁沙地  | 东北平原西部的西辽河下游干支流沿岸的冲积平原;第四纪河流冲积、湖积沙质沉积物 | 海拔 120~800 m;固定、半固定沙地为主(占 80%),形态主要是梁窝状沙丘、沙垄和灌丛沙堆等;流沙沙丘主要是新月形沙丘和沙丘链,占沙地总面积的 17.5% <sup>[46]</sup>                                  | 5.82 万 <sup>[8]</sup><br>5.04 万 <sup>[46]</sup> | 温带半干旱大陆性季风气候;年降水量 350~500 mm,年平均气温 3~7℃,春季平均风速 4.2~5.9 m·s <sup>-1</sup>                                      | 原生景观为沙地发育半干旱区特有的榆树疏林草原,主要分布在固定沙丘、半固定沙丘;现多已被处于不同发育阶段的小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿等灌草丛群落替代                                     | 地带性和非地带性土壤广泛发育、交错分布,以风沙土和退化的沙质栗钙土为主                   |
| 浑善达克沙地 | 内蒙古中部锡林郭勒草原南段;河湖相沉积物、基岩风化              | 海拔 1 150~1 500 m;以固定、半固定沙丘为主(占 87.1%),形态为沙垄、抛物线形沙丘;流动沙丘呈斑点状分布在沙地西部(12.9%);典型的沙丘活化型沙漠化土地,具有较宽广的丘间低地,半固定沙丘迎风坡普遍形成风蚀窝 <sup>[46]</sup> | 4.71 万 <sup>[8]</sup><br>2.92 万 <sup>[46]</sup> | 温带半干旱大陆性季风气候;年降水量沙地东南部 350~400 mm,向西北逐渐递减至 100~200 mm;年平均温度 0~3℃,年平均风速 3.5~5 m·s <sup>-1</sup> <sup>[8]</sup> | 自东向西为草甸草原、典型草原和荒漠草原。沙地东部广泛分布榆树疏林及针阔叶乔木白桦等超地带性植被;中西部分布小叶锦鸡儿灌丛、蒙古虫实等各类灌草丛;西部分布小果白刺、沙鞭、冷蒿等                    | 地带性土壤:沙地东部为栗钙土,西部为棕钙土;非地带性土壤:风沙土、草甸土、沼泽土              |
| 毛乌素沙地  | 鄂尔多斯高原南部,陕北黄土高原北部,宁夏中东部;河湖相沉积物、基岩风化    | 海拔 1 200~16 00 m;沙地自西北向东南倾斜,以固定及半固定沙丘为主(占 68.4%),形态类型主要有沙垄、抛物线沙丘及灌丛沙堆;固定、半固定沙丘和流动沙丘相互交错分布  | 5.64 万 <sup>[8]</sup><br>3.89 万 <sup>[46]</sup> | 温带半干旱大陆性气候;年降水量东南部 400~440 mm,向西递减至 250 mm 左右;年均温 6~9℃,年平均风速 2.1~3.3 m·s <sup>-1</sup>                        | 沙地中东部属于干草原地带,沙地西部边缘属于向荒漠过渡的荒漠化草原带。叉子圆柏灌丛等天然植被仅在少数地段存在,多为次生植被和人工植被  | 分布为由东北-西南向排列的水平地带性变化,即淡栗钙土和棕钙土;草原地带的土壤以风沙土为主,东南部分布黑垆土 |
| 呼伦贝尔沙地 | 内蒙古东北部呼伦贝尔高原;第四纪河湖相沉积沙                 | 海拔 600~800 m;以固定沙丘和半固定沙丘为主(占 95%),形态多为梁窝状、蜂窝状、沙垄、灌丛沙堆和缓起伏沙地,自北向南分布 3 条沙带   | 1.98 万 <sup>[8]</sup><br>0.64 万 <sup>[46]</sup> | 中温带半干旱、半湿润气候;年降水量 280~400 mm,年平均温度较低,为 -2.5~0℃;春季干燥多风,平均风速 4~5 m·s <sup>-1</sup>                              | 沙地东部为森林草原植被(以白桦、山杨及羊草等为主),分布天然樟子松林;中部为典型草原植被,分布榆树疏林;盐蒿灌丛是森林草原向典型草原过渡地带的特殊群系;西部典型干草原(克氏针茅、隐子草占据优势)小叶锦鸡儿数量增加 | 地带性土类为栗钙土,非地带性土壤以风沙土为主                                |

注:部分内容引自文献[8,46],以及根据“中国荒漠主要植物群落特征调查”项目(2017FY100200)资料整理,部分数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)。

20 世纪以来,尽管气候干湿波动对数年和数十年的土地沙漠化有显著影响,但叠加在自然因素(地质地貌、气候变化)之上的人类不合理的经济活动是影响中国北方农牧交错带现代沙漠化过程的主要因素<sup>[20,55-57]</sup>。过度的农垦、放牧、樵采及水资源利用等不合理土地利用方式和程度的增加使以土壤侵蚀为主要形式的土地沙漠化过程加速 4~10

倍<sup>[58]</sup>。各时间段不同沙区人为活动方式、强度并不一致,也导致了不同地区沙漠化发生时期的强烈差异。

2.2 半干旱区沙地沙漠化时空动态

沙漠化过程是动态渐变的土地退化过程。20 世纪 50 年代末至今,中国半干旱区沙漠化土地变化

整体上经历了先发展后逆转的过程<sup>[6]</sup>。四大沙地沙漠化在2000年以前呈发展趋势,主要来自不合理的人类活动,对沙地资源的利用强度远远超过了资源恢复的限度;2000年之后的沙漠化土地呈减少趋势,其原因主要与生态调控政策及治理工程的实施密切相关<sup>[5]</sup>。

科尔沁沙地沙漠化土地在空间上表现为由东向西、由北向南逐渐加剧的格局<sup>[59]</sup>。1975—2015年,科尔沁沙地风沙地貌覆盖面积呈减小趋势,年均减小率0.31%,流动型沙丘面积减小,固定半固定类型沙丘面积增加;社会经济因素对沙丘演化的累计贡献率为64.26%;湖泊群面积整体呈波动减少趋势,多被围湖造田<sup>[60]</sup>。1949年以来科尔沁沙地经历4次大规模垦荒,土地利用格局变化体现在耕地面积大幅度增加,草地等其他用地面积减少<sup>[61]</sup>。不合理的人类活动改变着土地的适宜性,使得部分草地、耕地发生退化,进而向沙地转化<sup>[62]</sup>。

1990—2017年,毛乌素沙漠化土地面积共减少1 684.09 km<sup>2</sup>,平均62.37 km<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup>;沙漠化土地重心迁移与沙化土地空间分布趋势基本一致,表现为西北部土地沙漠化程度严重,东部反之<sup>[63]</sup>。1975—2019年,毛乌素沙地沙质荒漠化的分布范围与强度呈现先增强后减弱的变化特征,气候与水文条件变化对其影响较弱;2000年以前沙质荒漠化的扩张与农牧活动、矿产资源开发等活动密切相关<sup>[64]</sup>,且沙地内部各区域沙漠化土地分布的影响因素各不相同<sup>[19]</sup>。

1987—2000年浑善达克沙地沙漠化的快速发展,沙漠化面积增加4 355 km<sup>2</sup><sup>[65]</sup>,表现为流动沙地和半固定沙地扩展<sup>[66]</sup>。超载过牧和过垦是沙漠化发展迅速的直接原因<sup>[67-68]</sup>。2000—2020年,浑善达克沙地NDVI呈现波动上升趋势<sup>[69]</sup>,沙漠化速度减缓,其中京津风沙源治理工程在沙化土地治理上成效明显<sup>[29]</sup>。局部地区沙漠化土地存在向外缘扩张态势,河流湖泊萎缩,水域面积30年间下降37.65%<sup>[61,65]</sup>。

1984—2000年呼伦贝尔沙漠化发展迅速,沙漠化土地增加率为72.1 km<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[70]</sup>,不同程度沙漠化土地面积均为发展趋势<sup>[71]</sup>。人口增加及不合理的经济活动(对森林资源的破坏、滥垦和过度放牧)是呼伦贝尔土地沙漠化强烈发展的主要因素<sup>[72-73]</sup>。气温升高、降水量减少和极端气候事件频发加速了呼伦贝尔沙地固定沙丘活化和植被盖度下降<sup>[74-76]</sup>。

### 3 沙漠化土地植被-土壤协同演变特征

植物与土壤直接进行物质和能量交换,二者之间的相互作用决定了沙漠化的正、逆过程。植被的生长和演替依赖于良好的土壤环境,而土壤环境同样需要处于进展演替中的植被来不断改善<sup>[77]</sup>。由于不同区域沙地土壤质地和粗化速率不同,导致沙漠化演变过程中土壤理化特性存在差异<sup>[78]</sup>,植被特征与土壤养分之间的相互关系又依赖于不同的空间尺度<sup>[79]</sup>。

沙漠化程度加剧会导致土壤中与沙粒结合的颗粒有机碳和全氮含量显著降低<sup>[80-81]</sup>,土壤酶活性下降<sup>[82]</sup>,植物物种多样性和生产力减少<sup>[83]</sup>。土壤黏粉粒损失介导的土壤粗化、松散度的增加、有机质和养分含量的降低是植被退化的主要原因<sup>[1,4]</sup>。在半干旱区,沙地造林是实现土壤固碳和恢复退化生态系统的有效措施<sup>[84-85]</sup>。流动沙地经过植被建设和封育保护,能显著促进沙地生物结皮发育和土壤改良<sup>[86]</sup>;固沙和植被恢复措施可以显著增加土壤养分和植物生物量<sup>[87-88]</sup>。毛乌素沙地沙漠化逆转过程中土壤颗粒均表现出显著的固碳效应,且以粉粒为主要固碳组分<sup>[89-90]</sup>。

不同引种地区沙地樟子松土壤碳氮储量存在差异,林龄显著影响樟子松林土壤碳氮储量<sup>[91]</sup>。樟子松林在其天然分布的呼伦贝尔沙地景观格局较为稳定,具有较好的碳循环潜力和土壤真菌群落结构<sup>[92]</sup>。不同沙地樟子松人工林土壤养分和微生物生物量随林龄的增加存在不同的变化趋势;科尔沁与毛乌素沙地樟子松人工林主要限制因子为土壤氮,呼伦贝尔沙地樟子松林需要更多土壤有机碳来满足土壤微生物需要<sup>[91-93]</sup>。榆林沙区樟子松林土壤碳含量的增加与枯落物输入密切相关,土壤氮、磷含量的增加主要与细根养分相关,碳磷比是影响樟子松林地植物-土壤间养分交互的关键<sup>[94]</sup>。Ning等<sup>[95]</sup>认为植物在元素含量和凋落物输入方面存在差异,种植含氮量高的物种可以通过缓解氮限制从而改善草地的恢复<sup>[96]</sup>。

邱开阳等<sup>[97]</sup>在毛乌素沙地南缘研究表明,0~5 cm土壤水分含量与植物群落物种数显著正相关,是制约植被物种空间分布的关键因素。沙地土壤水分生境改变是群落演替的主要原因<sup>[98]</sup>。Liu等<sup>[99]</sup>研究表明,科尔沁沙地固沙植被恢复和植被盖度增加减少了土壤水分深层渗流和地下水补给。因此,

在不同演替阶段修复时要注意选取不同的物种来适应土壤水分、养分特征。正确理解沙地植物-土壤协同恢复效应和驱动机理,对半干旱区快速、高质量生态恢复及可持续管理极为重要。

## 4 存在的主要问题和建议

半干旱区典型沙地(四大沙地)是中国防治沙化和荒漠化的关键地带,沙漠化土地发展的根本原因是沙区脆弱的生态环境和人类活动相互影响、叠加放大,超出了自然的承受力。中国针对四大沙地的实际情况,按照局域、区域、流域等不同生物-地理单元,实施整体管控、系统治理,全面提质增效,形成了成熟高效的防沙治沙技术模式和治理体系<sup>[100]</sup>。例如毛乌素沙地综合治理模式、塞罕坝生态治理模式、京津风沙源治理工程等。但是,前期工作更多地侧重于防护林体系的建设、沙地植被的建植等工作,而对于支撑沙地生态植被、并遭受损坏的水生态系统,却没有纳入修复治理规划。沙区农业用水和生态用水矛盾突出,导致土地沙化的人为因素依然存在。现存的沙地生态系统缺乏科学合理的经营管理方式,使得一方面原生植被继续退化,另一方面,通过人工措施恢复起来的植被在一段时间之后又开始退化<sup>[101]</sup>,极大地限制了沙地生态系统功能的充分发挥。

1956—2016年,中国东部沙区气候呈现明显的暖干化趋势,以及区域尺度极端气候事件的发生<sup>[102]</sup>,势必会对半干旱区沙地植被恢复、土地沙质荒漠化逆转及生态系统稳定性带来严重的不利影响。研究发现,浑善达克和科尔沁等沙地的樟子松林难以天然更新<sup>[103]</sup>,在沙地生长季气温升高背景下可能会发生进一步退化<sup>[104]</sup>,导致其衰退的实质是水量失衡<sup>[105]</sup>。土壤水分的急剧下降是科尔沁沙地樟子松人工林演变后期面临的主要挑战<sup>[34]</sup>。在加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设国家重大战略背景下,如何全力打好科尔沁和浑善达克两大沙地歼灭战,实现半干旱区沙地生态系统管理和区域社会经济协调发展任务依然艰巨<sup>[106]</sup>。

**沙区人地关系与可持续发展。**中国农牧交错带沙地发展的显著特点是防沙治沙兼顾民生与发展。①各级政府部门应深入实地全面调研评估土地沙漠化治理情况,着力完善沙地生态治理与管护政策体系,持续加大生态修复专项资金及农牧民种植养殖补贴投入;②在有限的土地和水资源之下,

实施基于高分辨率数据的土壤测绘和水资源承载力评估,以水定植;③加强半干旱区沙地林草植被建设、水资源优化配置与调控等重点领域的科学研究和技术攻关,以及人类生产系统与土地系统之间的反馈作用机制研究,合理界定沙地生态系统植被稳定恢复的生态阈值;④统筹防沙治沙和管沙用沙之间的耦合关系,吸引社会力量参与,发挥农牧民生态建设的主体地位,高质量推进生态畜牧业、生态光伏、沙地旅游等沙区特色沙产业模式,促进山水林田湖草沙一体化保护。

**基于水量平衡的沙地植被恢复及其稳定性。**目前,四大沙地区域植被恢复过程中大都存在着物种单一、结构简单的问题,如植被类型单一,多为结构简单的人工纯林等(如樟子松林、榆树林、杨树林等)。区域水分平衡原则决定了不同沙区沙丘、丘间地植被盖度的临界值大小<sup>[107]</sup>。科学治沙亟须在查明区域水资源承载力的基础之上,遵循自然气候带植被分布规律和立地条件的空间异质性,针对不同沙丘类型构建近自然土地覆盖与配置的最佳模式和植被建设的生态密度。①揭示固沙植物耗水规律,科学估算不同类型固沙植被的水资源承载力,降低地下水资源开发利用量,提高水资源利用效率。②采用适地适树原则,遵循沙地植被自然演替规律,避免大面积造林,坚持近自然恢复的科学理念,建立沙障+乔灌木疏林型植被配置技术模式,优化固沙植被结构。同时加强对人工固沙植被的长期监测、生态系统服务功能评估。

**植被保护和可持续利用。**建立持续稳定、优质高效的植被保护及可持续利用体系是生态系统治理的基本前提,同时也是推动区域经济发展的先决条件。本文结合历史调查数据,针对四大沙地植被保护和可持续利用提出建议。

**毛乌素沙地。**①加强原生植被的保护和利用:毛乌素沙地原生植被主要包括叉子圆柏(*Juniperus sabina*)群落和长芒草(*Stipa bungeana*)群落。叉子圆柏是柏科刺柏属匍匐灌木,是固定半固定沙地的重要植物群落。②开展蒿属植物群落结构调整:毛乌素沙地以蒿属植物为建群种(或共建种)的群落类型占比75.71%。蒿属植物群落相对简单,生物多样性和可利用性较低,可通过人工辅助措施,促使黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)植物群落向下一个演替阶段发展。

**浑善达克沙地。**①保护适生乡土乔灌木资源:

在浑善达克沙地,注意保护白杆(*Picea meyeri*)、榆树(*Ulmus pumila*)及长梗扁桃(*Prunus pedunculata*)等适生乡土乔灌木资源,作为沙区绿化和防护林建设的种源基地。在人为干扰较为严重的地区,采取建立关键物种自然保护地、沙化土地封禁保护区,保障群落和生态系统的稳定演替。②坚决推行禁牧轮牧制度:为科学管理和利用乡土植被,须保证乡土灌木幼株有连续5年左右的生长期。浑善达克沙地东部地区(克什克腾旗、正蓝旗、多伦县)降水条件好,可采取5(年禁牧)-3(年放牧)制,西部地区降水差,可以采取5(年禁牧)-1(年放牧)制。

科尔沁沙地。①农牧业发展与沙地保护相结合:在科尔沁沙地,需要加快推进沙区及周边节水农业发展,推广以浅埋滴灌为主的水肥一体化技术。合理调整农牧业土地利用结构,地力不好的耕地转林地和草地,对放牧行为合理引导。②人工植被管理与利用模式:在构建人工林的过程中需要重点考虑群落的稳定性,遵循沙区植被演替规律。③加强外来入侵物种光梗蒺藜草(*Cenchrus spinifex*)的防治,以及适沙经济植物开发利用。

呼伦贝尔沙地。①进行零星沙地治理,防止沙地扩展:零星分散的风蚀沙坑、风积沙丘、沙化交通道路和牧道等,应及时制止零星沙地因风蚀逐步扩大的趋势,控制沙地内部活化、外部扩展,将沙化消灭在萌芽状态。②加大科技支撑投入力度:适度发展羊柴(*Corethroedendron fruticosum*)、锦鸡儿等加工饲料产业,为牧民创造更多的经济效益,提高牧民对沙地治理、改善生态环境的积极性。③强化沙地治理项目区的保护和恢复:呼伦贝尔沙地地势平缓,沙丘起伏不大,有效降雨优于其他沙地,应加大飞播造林力度,遏止沙化蔓延趋势,恢复草场生产力。

**致谢:**感谢“内蒙古中东部半干旱荒漠主要植物群落调查”项目(2017FY100205)研究团队提供了关于四大沙地主要植物群落类型、特征与现状的调查报告。

#### 参考文献:

- [1] 赵哈林. 沙漠生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 朱震达. 全球变化与荒漠化[J]. 地学前缘, 1997, 4(1/2): 213-219.
- [3] 董光荣. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [4] 赵哈林, 周瑞莲, 王进, 等. 呼伦贝尔沙质草地植被的沙漠化演变规律及其机制[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 565-571.
- [5] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 王涛, 宋翔, 颜长珍, 等. 近35a来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1351-1356.
- [7] 石书兵. 中国沙漠·沙地·沙生植物[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [8] 王涛. 中国北方沙漠与沙漠化图集[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [9] 黄振英, 叶学华, 崔清国, 等. 长期生态学研究为沙地生态恢复和适应性管理提供理论与技术支撑[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 1006-1013.
- [10] 林年丰, 汤洁. 中国干旱半干旱区的环境演变与荒漠化的成因[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 24-29.
- [11] 陈玉福, 蔡强国. 京北浑善达克沙地荒漠化现状、成因与对策[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4): 353-359.
- [12] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科技出版社, 2003.
- [13] 赵哈林, 苏永中, 周瑞莲. 我国北方沙区退化植被的恢复机理[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 323-328.
- [14] 赵哈林. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [15] Wang T, Tsunekawa A, Xue X, et al. Combating aeolian desertification in Northeast Asia [M]. Singapore: Springer Nature, 2022.
- [16] 王涛, 赵哈林. 中国沙漠科学的五十年[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 3-23.
- [17] 杨文斌, 王涛, 熊伟, 等. 低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 75-80.
- [18] 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析: 以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7045-7048.
- [19] 冯坤. 近40a来中国四大沙地土地沙漠化区域差异性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [20] 吴波. 我国荒漠化现状、动态与成因[J]. 林业科学研究, 2001, 14(2): 195-202.
- [21] 刘俊壕, 周海盛, 郭群. 中国北方干旱半干旱区沙漠化治理对植被格局的影响[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 204-213.
- [22] 朱芳莹. 中国北方四大沙地近30年来的沙漠化时空变化及气候影响[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [23] 张海妮. 中国半干旱区沙地NDVI对极端气候的响应[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [24] 胥国盛, 王翠萍, 李锋, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理, 2023(1): 1-7.
- [25] 周炎广, 王卓然, 青达木尼, 等. 浑善达克沙地固定沙丘风蚀坑形态变化及其动力学机制[J]. 科学通报, 2023, 68(11): 1298-1311.
- [26] 钱贵霞, 王晓欣, 李武, 等. 中国从防沙治沙到管沙用沙的演变过程与实现路径[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 8-16.
- [27] 蒋德明, 张娜, 阿拉木萨, 等. 我国固沙植物抗旱性及基于水量平衡的沙地造林合理密度研究进展[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 75-83.

- [28] 孙迎涛, 岳艳鹏, 成龙, 等. 毛乌素沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)生长及生物量分配对沙漠化的响应[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 123-133.
- [29] 李晓松, 张磊, 姬翠翠, 等. 2000~2018年京津风沙源沙化土地时空动态与归因分析[J]. 科学通报, 2023, 68(11): 1343-1355.
- [30] 白雪梅, 春喜, 斯琴毕力格, 等. 近45a内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化[J]. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1086-1094.
- [31] 李玉霖, 赵学勇, 刘新平, 等. 沙漠化土地及其治理研究推动北方农牧交错区生态恢复和农牧业可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 832-840.
- [32] Chen X P, Zhao X Y, Zhao Y M, et al. Interaction of climate change and anthropogenic activity on the spatiotemporal changes of surface water area in Horqin Sandy Land, China[J]. Remote Sensing, 2023, 15(7): 1918.
- [33] Liu X Y, Lai Q, Yin S, et al. Exploring sandy vegetation sensitivities to water storage in China's arid and semi-arid regions[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108711.
- [34] 罗维成, 赵文智, 孙程鹏, 等. 科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 126-132.
- [35] 赵学勇, 安沙舟, 曹广民, 等. 中国荒漠主要植物群落调查的意义、现状及方案[J]. 中国沙漠, 2023, 43(1): 9-19.
- [36] 杨小平, 梁鹏, 张德国, 等. 中国东部沙漠/沙地全新世地层序列及其古环境[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(8): 1293-1307.
- [37] 朱永华, 罗平平, 郭倩, 等. 毛乌素沙地暖湿化特征分析及其对植被变化的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 160-172.
- [38] 李佳, 郭岚, 杨梅焕, 等. 毛乌素沙地气候变暖停滞现象及其气温和降水特征[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 72-80.
- [39] 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地地区的气候变化特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 557-562.
- [40] 张宝林, 罗瑞林. 浑善达克地区温度和降水的时空变化特征分析[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(5): 51-59.
- [41] 宁小莉. 浑善达克沙地沙漠化多源遥感监测[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2021.
- [42] 渠翠平, 关德新, 王安志, 等. 近56年来科尔沁沙地气候变化特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2326-2332.
- [43] 张美杰, 春喜, 梁阿如娜, 等. 近60年科尔沁沙地的气候变化[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 8-16.
- [44] 李思慧. 1961—2018年科尔沁沙地气候变化特征[J]. 内蒙古气象, 2019(5): 8-10.
- [45] 侯学煜. 1:1000000 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [46] 吴正. 中国沙漠及其治理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [47] 董光荣, 靳鹤龄, 陈惠忠, 等. 中国北方半干旱和半湿润地区沙漠化的成因[J]. 第四纪研究, 1998, 18(2): 136-144.
- [48] 汪佩芳. 全新世呼伦贝尔沙地环境演变的初步研究[J]. 中国沙漠, 1992, 12(4): 16-22.
- [49] 李森, 孙武, 李孝泽, 等. 浑善达克沙地全新世沉积特征与环境演变[J]. 中国沙漠, 1995, 15(4): 323-331.
- [50] 裘善文. 中国东北西部沙地与沙漠化[J]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [51] 赵延卓, 谢远云, 康春国, 等. 呼伦贝尔沙地风成砂-古土壤剖面记录的全新世气候变化[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 85-96.
- [52] 薛文萍. 中国北方季风边缘区全新世沙地演化空间差异性及其驱动机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [53] Yang X P, Scuderi L A, Wang X L, et al. Groundwater sapping as the cause of irreversible desertification of Hunshandake Sandy Lands, Inner Mongolia, northern China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(3): 702-706.
- [54] 李智佩. 中国北方荒漠化形成发展的地质环境研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
- [55] 孙继敏, 丁仲礼, 袁宝印. 2000a B.P. 来毛乌素地区的沙漠化问题[J]. 干旱区地理, 1995, 18(1): 36-42.
- [56] 赵鸿雁, 颜长珍, 李森, 等. 黄河流域2000—2020年土地沙漠化遥感监测及驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 127-137.
- [57] 孙毅, 丁国栋, 吴斌, 等. 呼伦贝尔沙地沙化成因及防治研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 122-124.
- [58] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 3-12.
- [59] 武金洲. 近40年科尔沁地区沙漠化过程及其驱动力研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [60] 社会石. 科尔沁沙地动态演化[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [61] 王卷乐. 中国环境变化遥感影像图集[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [62] 张继平, 常学礼, 蔡明玉, 等. 土地利用类型变化对沙漠化过程的影响: 以科尔沁沙地为例[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1): 39-44.
- [63] 韩雪莹, 杨光, 秦富仓, 等. 毛乌素沙地近30年沙漠化土地时空动态演变格局[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 144-150.
- [64] 朱刚. 陕北毛乌素沙地生态修复效果分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(6): 90-97.
- [65] 孙建芸. 基于遥感技术的浑善达克沙地荒漠化时空特征与动态分析[D]. 武汉: 湖北大学, 2017.
- [66] 赵媛媛, 武海岩, 丁国栋, 等. 浑善达克沙地土地沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 101-111.
- [67] 武健伟, 赵廷宁, 鲁瑞洁. 浑善达克沙地现代土地沙漠化发展动态与成因分析[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 36-40.
- [68] 康相武, 吴绍洪, 刘雪华. 浑善达克沙地土地沙漠化时空演变规律研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 1-6.
- [69] 罗嘉艳, 张靖, 徐梦冉, 等. 浑善达克沙地植被变化定量归因及多情景预测[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 614-624.
- [70] 郭坚, 薛娟, 王涛, 等. 呼伦贝尔草原沙漠化土地动态变化过程研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 397-403.
- [71] 那日苏. 呼伦贝尔沙地土地沙漠化时空变化特征分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2017.
- [72] 封建民, 王涛. 呼伦贝尔草原沙漠化现状及历史演变研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(3): 356-360.
- [73] 万勤琴, 朴起亨, 丁国栋, 等. 呼伦贝尔沙地草场沙漠化成因

- 分析[J].水土保持研究,2007,14(4):263-266.
- [74] 赵慧颖.呼伦贝尔沙地45年来气候变化及其对生态环境的影响[J].生态学报,2007,26(11):1817-1821.
- [75] 白殿奎,刘晶,宋卫士,等.呼伦贝尔市沙地气候变化特征[J].安徽农业科学,2010,38(33):18886-18887.
- [76] 胡新培,田海静,刘旭升,等.2007—2017年呼伦贝尔沙地植被覆盖度变化及驱动因素研究[J].中南林业调查规划,2019,38(1):50-57.
- [77] 杨梅焕.毛乌素沙地东南缘沙漠化演变机制与植物的耐胁迫性研究[D].西安:西北大学,2010.
- [78] 王进,周瑞莲,赵哈林,等.呼伦贝尔沙地和松嫩沙地草地沙漠化过程中土壤理化特性变化规律的比较研究[J].中国沙漠,2011,31(2):309-314.
- [79] 陈玉福,董鸣.毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析[J].植物生态学报,2001,25(3):265-269.
- [80] 王涛.沙漠化研究进展[J].中国科学院院刊,2009,24(3):290-296.
- [81] Zuo X A, Zhang J, Zhou X, et al.Changes in carbon and nitrogen storage along a restoration gradient in a semiarid sandy grassland[J].Acta Oecologica-International Journal of Ecology,2015,69:1-8.
- [82] 杨梅焕,曹明明,朱志梅.毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中土壤酶活性的演变研究[J].生态环境学报,2012,21(1):69-73.
- [83] Chen Y, Li Y Q, Cao W J, et al.Response of the plant-soil system to desertification in the Hulun Buir Sandy Land, China[J].Land Degradation & Development,2023,34(7):2024-2037.
- [84] Li Y Q, Brandle J, Awada T, et al.Accumulation of carbon and nitrogen in the plant-soil system after afforestation of active sand dunes in China's Horqin Sandy Land[J].Agriculture, Ecosystems & Environment,2013,177:75-84.
- [85] Li Y Q, Awada T, Zhou X, et al.Mongolian pine plantations enhance soil physico-chemical properties and carbon and nitrogen capacities in semi-arid degraded sandy land in China[J].Applied Soil Ecology,2012,56:1-9.
- [86] 赵哈林,郭铁瑞,周瑞莲,等.植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1657-1663.
- [87] 闫德仁,钟贵廷,杜敏,等.沙地樟子松天然林土壤肥力变化的研究[J].内蒙古林业科技,2009,35(3):1-4.
- [88] Zhou W X, Li C J, Wang S, et al.Effects of vegetation restoration on soil properties and vegetation attributes in the semi-arid and arid[J].Journal of Environmental Management,2023,343:118186.
- [89] 马建业,佟小刚,李占斌,等.毛乌素沙地沙漠化逆转过程土壤颗粒固碳效应[J].应用生态学报,2016,27(11):3487-3494.
- [90] Bai L H, Zhang H, Zhang J G, et al.Long-term vegetation restoration increases carbon sequestration of different soil particles in a semi-arid desert[J].Ecosphere,2021,12:e03848.
- [91] 柳叶,任悦,高广磊,等.沙地樟子松人工林土壤碳氮磷储量分布特征[J].中国水土保持科学,2021,19(6):27-34.
- [92] 闫茹,冯薇,王玺婧.呼伦贝尔沙地不同固沙植物土壤真菌群落组成及多样性[J].中国水土保持科学,2021,19(1):60-68.
- [93] 林雅超,高广磊,丁国栋,等.沙地樟子松人工林土壤理化性质与微生物生物量的动态变化[J].生态学报,2020,39(5):1445-1454.
- [94] 拓卫卫,范家伟,周雅洁,等.毛乌素沙地樟子松林植物-土壤生态化学计量特征演变关系[J].水土保持研究,2023,30(6):177-186.
- [95] Ning Z Y, Zhao X Y, Li Y L, et al.Plant community C:N:P stoichiometry is mediated by soil nutrients and plant functional groups during grassland desertification[J].Ecological Engineering,2021,162:106179.
- [96] 卢建男,刘凯军,王瑞雄,等.中国荒漠植物-土壤系统生态化学计量学研究进展[J].中国沙漠,2022,42(2):173-182.
- [97] 邱开阳,谢应忠,许冬梅,等.毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤水分和植被空间格局[J].生态学报,2011,31(10):2697-2707.
- [98] 李新荣,赵雨兴,杨志忠,等.毛乌素沙地飞播植被与生境演变的研究[J].植物生态学报,1999,23(2):21-29.
- [99] Liu X P, He Y H, Sun S S, et al.Restoration of sand-stabilizing vegetation reduces deep percolation of precipitation in semi-arid sandy lands, northern China[J].Catena,2022,208:105728.
- [100] Wang T, Xue X, Zhou L, et al.Combating aeolian desertification in northern China[J].Land Degradation & Development,2015,26:118-132.
- [101] 路伟伟,吴波,白建华,等.樟子松人工林退化原因及研究展望[J].科学通报,2023,68(11):1286-1297.
- [102] 侯承志,黄丹青,桂东伟,等.1961-2019年中国北方沙漠沙地极端气候变化特征及其影响因素[J].地理科学,2023,43(8):1495-1505.
- [103] 朱教君,康宏樟,许美玲.科尔沁沙地南缘樟子松(*Pinus sylvestris* var.*mongolica*)人工林天然更新障碍[J].生态学报,2007,27(10):4086-4095.
- [104] 高岩,张宇清,秦树高,等.固沙植被景观格局变化及其影响因素[J].北京林业大学学报,2020,42(4):102-112.
- [105] 宋立宁,朱教君,郑晓.基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案[J].生态学报,2017,36(11):3249-3256.
- [106] 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.
- [107] 史培军,张宏,王平,等.我国沙区防沙治沙的区域模式[J].自然灾害学报,2000,9(3):1-7.

## Characteristics of ecological environment changes and advices for combating desertification in typical semi-arid sandy land

Lu Jiannan<sup>1</sup>, Li Yuqiang<sup>1,2</sup>, Zhao Xueyong<sup>1</sup>, Li Baocheng<sup>3</sup>, Wang Xuyang<sup>1,2</sup>, Zhang Rui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands / Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Daliushu State-owned Sand Control Forest Farm in Naiman Banner, Naiman Banner 028300, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Sandy lands, as vital components of terrestrial ecosystems, possess unique structures and functions. In the agro-pastoral transitional zone of northern China's semi-arid and semi-humid regions, sandy lands have undergone rapid human-induced changes, both positive and negative. These changes are primarily reflected in phases of "destructive utilization" and "protective restoration utilization". Extensive development models have caused issues such as land desertification, over-exploitation of water resources, and ecological imbalance. This study focuses on the Horqin Sandy Land, Mu Us Sandy Land, Hunshandake Sandy Land, and Hulunbuir Sandy Land. It reviews literature and research findings on the regional differentiation characteristics of natural elements in typical semi-arid sandy lands, the spatiotemporal evolution of desertified land and its driving forces, and the co-evolution of vegetation-soil characteristics. Given the current state of land desertification and its management amidst climate change and human activities, future research should prioritize the coordination of human-land relationships in sandy lands under policy guidance, enhance ecological restoration and vegetation stability based on regional water balance, and scientifically advance key ecological engineering projects, such as those in the Horqin Sandy Land and Hunshandake Sandy Land, thereby promoting sustainable development across ecological, economic, and social systems in semi-arid sandy lands.

**Key words:** semi-arid regions; sandy land; natural elements; desertification; ecological governance