

前 言

乌珠穆沁草地是内蒙古优质的天然草地之一，位于内蒙古高原东北部，是锡林郭勒草原的重要组成部分，也是内蒙古地区畜牧业发展的生态基石。然而，自 21 世纪以来，该地区的生态环境面临严峻挑战，草地退化和沙化问题日益加剧，生态保护刻不容缓。数据显示，截至 2025 年，仅东乌珠穆沁旗的沙化土地面积就约达 3.46 万 hm^2 ，平均每年风沙侵蚀导致的草原损失约 1000 hm^2 。乌珠穆沁沙地作为内蒙古典型的沙地区域，其沙漠化形势尤为严峻，受气候变化和人类活动的双重影响，生态系统的脆弱性日益突出。气候变化是乌珠穆沁草地沙漠化的主要驱动力之一，而不合理的人类活动，如过度放牧、过度开发农牧业资源及森林砍伐等，进一步加剧了土壤退化和植被破坏，促使沙漠化进程加快。为有效遏制乌珠穆沁沙地沙漠化进展，必须采取科学合理的生态治理措施，包括植被恢复、土壤保护与水资源管理，并加强长期监测与研究，以科学指导生态治理工程，实现生态环境的有效改善。

乌珠穆沁沙地正面临生态退化、经济发展受限和景观功能受损等多重挑战。长期的人类活动导致植被稀疏、生物多样性下降，生态系统较为脆弱。为提升其生态功能，需加强综合治理，采取有效措施恢复植被、保护野生动植物，以改善整体生态环境。与此同时，受制于基础设施薄弱和经济发展模式单一，该地区的经济发展仍较为滞后，主要依赖农牧业和旅游业。未来应加大基础设施建设力度，改善交通、水利、电力等基础设施条件，吸引投资，促进产业多元化发展，实现经济与生态的协调发展。乌珠穆沁沙地拥有独特的沙漠景观资源，但长期沙化及不合理开发影响了其观赏价值与可持续吸引力，因此生态修复工程需与景观功能提升紧密结合，加强整体规划，突出地域特色，实现生态恢复与景观优化的统一。

基于对乌珠穆沁沙地生态系统的深入认识，本书创新性地提出构建“山水林田湖草沙”复合型生态景观模式，在生态恢复过程中兼顾景观功能和经济效益，突破传统单一植被恢复的局限，在生态修复过程中同步实现景观功能提升和生态经济价值转化，推动生态治理范式从被动防御型的“输血式”干预向主动造血型的可持续发展转变。针对乌珠穆沁沙地面临的生态挑战与治理需求，研究团队充分利用遥感技术、野外调查、新型防风固沙沙障技术及野外气象数据分析等多种科学手段，从土地利用变化、植被特征、土壤性质、风沙运动环境、风沙侵蚀及沙障固沙等方面展开系统研究，提出了乌珠穆沁沙地生态脆弱区的植被恢复与重建技术，为沙地生态治理提供了科学理论依据和技术支持。

本书依托内蒙古自治区科技计划“乌珠穆沁沙地生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2020GG0077)项目的研究成果,由内蒙古农业大学、内蒙古自治区林业科学研究院、中国农业科学院草原研究所、内蒙古自治区水利科学研究院等单位的50余名专家学者共同撰写完成。

本书具体分工如下:第一章“乌珠穆沁草原生态环境”由党晓宏¹、蒙仲举¹、刘阳²、张昊³、高琴⁴完成。第二章“乌珠穆沁沙地沙化土地形成及演化机制”由党晓宏¹、黄海广⁵、袁立敏⁶、赵飞燕⁷、任晓萌⁸、杨制国⁵、李元昊¹完成。第三章“乌珠穆沁沙地表层沉积物特征及其环境指示意义”由孙世贤⁹、丁延龙⁷、王瑞东¹、白浩江²⁴、刘玥²⁵、李双立¹¹、张昊³、李浩年¹、吴昊¹²、吴晓光¹³、吴彩霞¹⁴完成。第四章“乌珠穆沁沙地风沙运动环境与土壤风蚀特征”由张昊³、王珊¹⁰、高岳¹、王春颖⁵、冯伟¹⁵、李浩天¹⁶、宋慧芳²³、迟文峰¹⁰、赵宏胜¹完成。第五章“乌珠穆沁草原退化程度对植被-土壤的影响”由刘泓鑫¹⁷、刘湘杰¹⁸、许宏斌⁵、宁静⁵、李臻²⁶、张格¹⁸、张超¹⁰、张胜男⁵、李浩天¹⁶完成。第六章“人为干扰对乌珠穆沁沙地生态环境的影响”由段娜¹⁸、娄佳乐⁴、徐志明¹⁹、龚萍¹⁰、孙世贤⁹、杨制国⁵、韩彦隆¹完成。第七章“乌珠穆沁沙地沙障治理技术”由朱泊年²⁷、杨蕊¹、高亮¹、高君亮¹⁸、高海燕⁵、郭春晖²⁰、郭振宁⁹、梁钰镁¹、藺博²¹、魏一凡⁵完成。本书由党晓宏¹、刘阳²、蒙仲举¹、张昊³、高琴⁴统稿,由高永¹、胡春元¹、卫智军²²、汪季¹担任顾问。

在本书撰写过程中,我们参考并引用了大量国内外相关研究文献,在此向所有为本书提供参考和支持的学者表示衷心的感谢。同时,感谢科学出版社的大力支持及编辑团队的辛勤付出。由于编者水平有限,书中如有不足之处,恳请广大读者批评指正,以期进一步完善和提高研究成果的科学性与实用性。

编 者

2025年11月1日

1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院; 3. 北京林业大学水土保持学院; 4. 中国林业科学研究院林业研究所; 5. 内蒙古自治区林业科学研究院; 6. 内蒙古自治区林业和草原科技创新中心; 7. 内蒙古财经大学旅游学院; 8. 内蒙古气象科学研究所; 9. 中国农业科学院草原研究所; 10. 内蒙古财经大学资源与环境经济学院; 11. 锡林郭勒盟林业和草原局; 12. 内蒙古自治区生态与农业气象中心; 13. 内蒙古自治区国土空间规划院; 14. 内蒙古西乌珠穆沁旗林业事业发展中心; 15. 锡林郭勒职业学院; 16. 内蒙古自治区第二林业和草原监测规划院; 17. 伊金霍洛旗水利技术服务中心; 18. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心; 19. 鄂尔多斯市腾达勘察设计有限公司; 20. 包头市东河区农牧局; 21. 内蒙古建通科技发展集团有限公司; 22. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院; 23. 内蒙古农村商业银行股份有限公司; 24. 中国科学院西北生态环境资源研究院; 25. 内蒙古农业大学农学院; 26. 达茂联合旗林业和草原局; 27. 陕西省森林管理局

目 录

1	乌珠穆沁草原生态环境	1
1.1	乌珠穆沁草原生态环境退化背景	1
1.2	乌珠穆沁草原生态环境问题	3
1.2.1	区位特征与景观矛盾问题初探	3
1.2.2	生态治理的科学性反思与优化路径	6
1.2.3	综合功能提升的挑战与对策	7
1.3	乌珠穆沁草原退化成因与治理研究	9
1.3.1	乌珠穆沁草原退化成因	9
1.3.2	乌珠穆沁草原治理措施	12
1.3.3	草原治理新思考	14
	参考文献	16
2	乌珠穆沁沙地沙化土地形成及演化机制	19
2.1	土地沙化演变	20
2.2	植被覆盖度时空变化特征	21
2.3	土地利用变化特征	24
2.3.1	土地利用类型变化分析	26
2.3.2	土地利用转移矩阵分析	29
2.4	沙地时空动态变化驱动力分析	33
2.4.1	主成分分析法	34
2.4.2	植被覆盖度变化自然影响因素分析	38
2.5	小结	39
	参考文献	40
3	乌珠穆沁沙地表层沉积物特征及其环境指示意义	43
3.1	乌珠穆沁沙地表层沉积物粒度特征	43
3.1.1	粒级组成特征	44
3.1.2	粒级参数特征	48
3.2	乌珠穆沁沙地表层沉积物地球化学元素特征	53
3.2.1	矿质全量元素特征	54

3.2.2 微量元素特征.....	56
3.3 粒度和地球化学元素特征的环境指示意义.....	59
3.3.1 沉积物粒度特征的环境指示意义.....	61
3.3.2 沉积物地球化学元素特征的环境指示意义.....	63
3.4 小结.....	67
参考文献.....	68
4 乌珠穆沁沙地风沙运动环境与土壤风蚀特征.....	73
4.1 乌珠穆沁沙地主要风沙运动环境特征及形成机制.....	74
4.1.1 起沙风特征.....	75
4.1.2 输沙势特征.....	78
4.1.3 土壤粒径特征.....	79
4.2 乌珠穆沁草原近地表土壤风蚀特征.....	81
4.2.1 RWEQ 模型环境因子分析.....	82
4.2.2 土壤风蚀量时空变化特征.....	98
4.2.3 防风固沙功能评估.....	104
4.2.4 土壤风蚀相关驱动因素交互作用分析.....	118
4.3 小结.....	129
参考文献.....	130
5 乌珠穆沁草原退化程度对植被-土壤的影响.....	133
5.1 不同草原退化程度对植物群落结构与土壤性质的影响.....	133
5.1.1 退化梯度上草原植物分类学组成的动态变化特征.....	134
5.1.2 各退化程度草原植被结构与组成特性对比研究.....	135
5.1.3 不同退化程度草原植物功能群重要值比较.....	136
5.1.4 不同退化程度草原植被型及优势种、伴生种比较.....	137
5.1.5 各级退化梯度草原间植物物种多样性指标的差异比较分析.....	137
5.1.6 不同退化程度草原植被物种相似度变化.....	138
5.1.7 不同退化程度草原植被物种生态位变化特征.....	139
5.2 不同退化程度植物群落结构与土壤环境特征响应.....	140
5.2.1 植被-土壤响应指标体系构建.....	140
5.2.2 西乌珠穆沁旗草甸草原退化等级指标体系分析.....	141
5.2.3 聚类指标的主成分分析.....	148
5.2.4 退化分类分级标准与退化综合指数的优化构建.....	150

5.2.5 不同退化等级草甸草原植被和土壤相关特征	153
5.3 小结	159
参考文献	160
6 人为干扰对乌珠穆沁沙地生态环境的影响	161
6.1 放牧干扰下荒漠草原植物功能群数量特征与输沙量的关系	162
6.1.1 放牧对功能群落数量特征的影响	164
6.1.2 不同放牧强度对草地输沙率和输沙通量的影响	166
6.1.3 功能群数量特征与输沙量之间的相关性	168
6.2 切根+施肥对羊草人工草地草产量及其芽库的影响	170
6.2.1 切根+施肥对羊草功能性状的影响	172
6.2.2 切根+施肥对羊草种群特征的影响	173
6.2.3 切根+施肥对羊草芽库的影响	174
6.2.4 切根+施肥对羊草叶片和根茎激素的影响	174
6.2.5 羊草内源激素与芽库和功能性状的相关性分析	175
6.3 小结	176
参考文献	177
7 乌珠穆沁沙地沙障治理技术	179
7.1 文献计量视角下的沙障研究	180
7.1.1 文献发表年代分布	180
7.1.2 数据库来源分布	181
7.1.3 基金来源分布	182
7.1.4 文献作者及其合作网络情况	182
7.1.5 发文机构合作网络情况	183
7.1.6 关键词共现情况	184
7.1.7 关键词突现情况	186
7.2 乌珠穆沁沙地生物基可降解聚乳酸纤维沙障防风固沙效果	187
7.2.1 不同规格 PLA 沙障风速变化与流场特征	188
7.2.2 不同规格 PLA 沙障风沙输移特征	194
7.2.3 不同规格 PLA 沙障表层沉积物级配特征	201
7.2.4 不同规格 PLA 沙障近地表蚀积规律	205
7.3 乌珠穆沁沙地机械沙障对土壤性质与植被恢复的影响	209
7.3.1 不同机械沙障对土壤机械组成的影响	211

- 7.3.2 不同机械沙障对土壤化学性质的影响 217
 - 7.3.3 不同机械沙障对土壤可蚀性的影响 225
 - 7.3.4 不同机械沙障对植被恢复的影响 226
- 7.4 小结 229
- 参考文献 231

1 乌珠穆沁草原生态环境

1.1 乌珠穆沁草原生态环境退化背景

草原作为陆地生态系统的重要组成部分，发挥着至关重要的作用。它不仅可提供丰富的食物、氧气和其他自然资源，还能有效吸收二氧化碳，对全球碳循环和气候变化产生积极影响。此外，草原可改善土壤结构，提高土壤肥力，为农业生产提供充足的肥料，并能保护野生动植物的栖息环境，从而为人类提供更健康、安全的食物和生活环境。

全球草原总面积为 52.5 亿 hm^2 ，约占地球陆地总面积的 40.5%（不包括格陵兰岛和南极）（Kemp et al., 2013），是重要的物质产品生产基地，同时也因为其具有保护生物多样性和提供生态系统服务的功能，在区域生态安全和社会经济发展中发挥着重要作用（Bi et al., 2020; Liu et al., 2019; Zhou et al., 2017）。中国草原总面积为 2.6 亿 hm^2 ，约占陆地面积的 27.5%（韩国栋, 2021）。草原不仅是我国重要的畜牧业生产基地，还是多民族草原文化传承的载体。同时，草原作为重要的绿色生态屏障，具有调节气候、涵养水源、保护生物多样性和固碳等多种生态系统服务功能（Bardgett et al., 2021）。然而，在过去的几十年里，随着极端天气事件和人类活动干扰的增加，我国北方草原的生态问题日益严重，草地退化现象尤为突出（Liu et al., 2019; Zhang et al., 2016）。1982~2010 年，中国退化草原面积占草原总面积的 22.7%（Zhou et al., 2017），草原退化已成为我国主要的环境和社会经济问题，严重威胁到草地资源的可持续利用和区域生物地球化学循环（Zhang et al., 2016; Wang et al., 2016）。草原的大面积退化导致生态灾害频发，不仅制约了畜牧业的可持续发展，还对社会稳定和生态安全造成了重大影响（古琛等, 2022）。此外，全球气候变化（ CO_2 浓度升高、气温上升、降水模式变化）不仅对草原生态系统的生物多样性及稳定性产生了深远的影响（Thomas et al., 2004; Hampe and Petit, 2005），也加剧了退化草地恢复进程中的不确定性（Wilsey, 2021）。因此，遏制草原退化、加强退化草原治理和生态修复已成为亟待解决的重大难题。

内蒙古作为中国北方的重要生态屏障，地处国家生态安全战略的关键位置，其生态状况不仅直接关系到全区各族群众的生存与发展福祉，更深刻影响着华北、东北、西北乃至全国的生态安全格局。长期以来，内蒙古始终立足自身区情，服

务国家大局，确立了“筑牢我国北方重要生态安全屏障”“打造祖国北疆亮丽风景线”的发展目标，彰显出坚定的生态优先发展导向。作为全国荒漠化土地分布最集中、生态破坏最为严重的地区之一，内蒙古生态建设任务艰巨。党中央和国家领导人始终高度重视内蒙古生态治理工作，将其作为全国生态文明建设的重要组成部分，全力推进将其建设成为祖国北疆万里绿色长城的战略部署。党的二十大报告明确指出，中国式现代化是人与自然和谐共生的现代化，必须牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理的方针，站在人与自然和谐共生的高度谋划发展。历经长期而艰辛的防沙治沙实践，内蒙古不断总结经验，探索出一套具有地域特色的生态治理路径。经过多年持续不懈的努力，全区生态环境实现了从整体恶化向“整体遏制、局部好转”的历史性转变。荒漠化和沙化土地面积持续“双减少”，科尔沁沙地、毛乌素沙地等重点区域植被覆盖率显著提升，沙地边界逐步向内收缩，生态面貌明显改善。内蒙古以实际行动为维护祖国北方生态安全筑起了坚实屏障，作出了不可替代的重要贡献。

乌珠穆沁草原是内蒙古最好的天然草地之一，位于内蒙古高原东北部，是锡林郭勒草原的重要组成部分，也是构成畜牧业发展的物质基础。草原主体由东、西乌珠穆沁旗组成，总面积约 694 万 hm^2 ，其中可利用草场面积约 617 万 hm^2 ；其牧草平均高度达到 65cm，覆盖度约为 75%；牧草平均产量达到 242.88g/ m^2 。乌珠穆沁草原风貌保存完整，是唯一汇集内蒙古九大类型草原的地区，号称中国北方草原最华丽、最壮美的地段，素有“天堂草原”之美称，而东乌珠穆沁草原则是其中水草最丰美也是面积最大的草甸草原，它对保护大自然具有重要作用，不仅是重要的地理屏障，也是阻止沙漠蔓延的天然防线，是内蒙古生态环境稳定的重要保障，同时也是人类发展畜牧业的天然基地。然而近年来，该地区因气候变化和人类过度放牧等因素，草地退化现象日益严重。姜艳丰（2008）研究表明，由于垦荒和过度放牧，乌珠穆沁地区形成了沙化。东乌珠穆沁旗是受沙化影响较为严重的区域之一，其沙化土地面积约占草原总面积的 66.59%。随着时间的推移，沙化面积逐渐扩大，现如今，乌珠穆沁地区已经衍生出了中国第五大沙地——乌珠穆沁沙地。乌珠穆沁沙地处于中国北方典型草原区向旱作农业区过渡地带，是中国北方荒漠化较为严重的地区之一，其区域内的草地退化沙化已经对当地广大牧民的生产生活和区域生态环境安全构成了严重的威胁。

乌珠穆沁沙地位于典型草原地带，生态系统类型丰富且结构多样，主要包括沙地榆树疏林、草原、灌丛、河漫滩草甸、沼泽湿地等，形成了空间分布上具有一定规律性的复合生态格局。其主要土壤类型包括地带性的栗钙土和淡栗钙土，但实际分布中以风沙沉积形成的非地带性沙土为主。年降水量在草原区

属于相对较高水平，加之区域内人口密度较低、人为干扰程度轻微，植被类型保持了较为自然的状态，主要呈现为疏林灌丛草原景观，植被垂直结构和种类分布均表现出较高的多样性。区域内广泛分布疏林型植被，以榆树为代表，同时存在大量灌木型群落，绝大多数植物具耐旱性和抗风蚀能力，具有良好的固沙生态功能。乌珠穆沁地区还是中国北方天然牧场，据统计，1980~2021 年，该地区的大牲畜数量从 6.6 万头增加到 10.12 万头，绵羊数量从 28.51 万只增加到 100.7 万只，草场的牲畜密度从 2.7 只羊/km² 增加到 11.7 只羊/km²（内蒙古自治区统计局，2021）。

草地退化沙化已对当地广大牧民的生产和生活及区域生态环境安全构成了严重的威胁。现如今，乌珠穆沁沙地的生态环境遭遇严重退化，草地沙化现象日益突出。这不仅导致了草原生态系统受损，也直接影响到当地牧民的生计和生态安全。随着当地牲畜及人类活动的增加，其对草地产生的压力使得沙化面积不断扩大，生态灾害频繁发生。研究乌珠穆沁沙地的生态环境破坏与修复，不仅能够为当地生态治理提供科学依据，还能为政策制定者提供有效的管理措施。只有通过深入了解沙地的退化机制以及复原途径，才能探索出适合该区域的治理方法，进而推动草地资源的可持续利用，维护生物多样性，改善区域生态环境。此外，随着全球气候变化的加剧，乌珠穆沁沙地的生态修复对于增强草地的适应能力、提高其抵御外界冲击的能力具有重要意义。因此，加强对乌珠穆沁沙地生态环境的研究与治理是当前亟须解决的重大课题。

1.2 乌珠穆沁草原生态环境问题

乌珠穆沁草原的退化受多种因素共同驱动，生态系统承载能力正面临严峻挑战，沙化趋势逐步加剧，生态修复与治理的紧迫性日益凸显。自 20 世纪 50 年代起，该地区持续受到农业垦殖、过度放牧及矿产资源开采等人类活动的干扰，致使草地植被结构遭到破坏，生态功能逐渐削弱，大面积草地出现了不同程度的退化现象。这一过程不仅严重制约了当地农牧业的可持续发展，也对区域生态稳定性构成了威胁，并在一定程度上影响了牧民的经济收益和生活质量。当前，在推进乌珠穆沁沙地综合高效治理的过程中，仍面临着一系列关键性瓶颈问题，亟须从政策引导、技术路径、资源配置与机制保障等多方面协同发力，以实现区域生态系统的整体恢复与稳定。

1.2.1 区位特征与景观矛盾问题初探

乌珠穆沁沙地位于中国内蒙古自治区锡林郭勒盟，是祖国北方锡林郭勒草原

上的一条典型沙地带。其西部边缘的甘珠庙毗邻中蒙边境线，具有重要的地缘与生态战略意义。此外，乌珠穆沁沙地作为浑善达克沙地的重要沙源地，是该区域风沙活动的重要起始区域之一。作为我国沙地分布最集中、面积较大的典型代表，该区域兼具独特的自然景观与丰富的生态资源，因而在旅游开发与生态展示中具备一定优势。然而，乌珠穆沁沙地的自然景观在一定程度上与国家提出的“打造祖国北疆亮丽风景线”的战略目标存在不协调之处。亟须深入分析与关注其突出问题及成因。

（1）沙漠化现状与成因分析

乌珠穆沁沙地是中国境内典型的大型沙地系统之一，沙丘分布广泛，沙漠化程度较高。该区域沙漠化形成的原因较为复杂，主要归因于气候变化、人类活动干预以及自然环境条件的综合作用。在气候因素方面，乌珠穆沁沙地长期处于干旱至半干旱气候区，年降水量有限且时空分布不均，蒸发量远高于降水量，致使区域土壤水分严重匮乏，难以维系稳定的植被覆盖，从而导致裸露地表易受风蚀，沙化趋势日益加剧（Li et al., 2004）。人类活动亦是该地区沙漠化扩展的重要驱动力。长期以来，区域内存在过度垦殖、过度放牧、滥伐林木等现象，导致地表植被破坏和土壤结构退化，加速了风蚀作用并诱发了大范围土地退化过程（Liu et al., 2008）。其中，过度放牧造成的植被覆盖减少、水土流失等问题尤为突出，对生态系统的稳定性构成了严重威胁。此外，自然地理条件亦为沙漠化进程提供了有利背景。乌珠穆沁沙地地质构造复杂，地势起伏较大，广泛分布的沙质土壤质地疏松，抗风蚀能力差，极易在强风和沙尘暴等极端气象条件作用下发生风力搬运与沉积，从而形成大面积活动沙丘和半固定沙地（图 1-1）。



图 1-1 乌珠穆沁沙地沙漠化现状

针对日益严峻的沙漠化形势，中国政府已在乌珠穆沁沙地开展了多项生态恢复工程，重点措施包括通过人工植树造林和天然草地修复等手段提升植被覆盖率，以增强土地抗风蚀能力。同时，推进水土保持与水资源科学调控，防止土壤肥力流失，并加强生态监测与科学研究，为防治策略提供数据支撑与决策依据。总体

而言，乌珠穆沁沙地的沙漠化问题是自然因素与人为活动共同作用的结果。该区域生态系统脆弱、植被覆盖度低、土地退化问题突出，现状与“筑牢我国北方重要生态安全屏障”及“打造祖国北疆亮丽风景线”的总体要求存在较大差异。只有坚持综合治理、系统修复与科技支撑相结合，才能有效遏制沙漠化蔓延，推动区域生态功能整体恢复。

（2）生态脆弱性的成因与治理对策研究

乌珠穆沁沙地的生态脆弱性显著，承受着自然条件限制与人类活动影响的双重压力。尽管该区域具有一定的旅游开发潜力，但生态系统承载能力极其有限，大规模旅游及相关开发若无科学规划，极易对生态环境造成不可逆的损害。

从自然属性来看，乌珠穆沁沙地的土地资源本底质量较差。沙地土壤普遍贫瘠，有机质含量和含水量较低，养分供给不足，严重制约了植被的自然恢复与持续生长。该区域植被覆盖率长期处于较低水平，土壤抗风蚀和水蚀能力差，极易形成活动性沙丘，加剧沙漠化进程。此外，降水稀少、蒸发强烈的气候特征进一步加剧了水资源短缺的问题。大部分水分在渗透或蒸发过程中迅速流失，难以被土壤有效储存并供植物利用，直接限制了区域内动植物的存续能力及生态系统的稳定性。

在人为干扰方面，过度放牧、无序开垦与植被破坏是土地退化的主要驱动力。在许多牧场区域，放牧强度空间分布不均，管理缺乏系统性，放牧地点和时间的随意性极大地增加了地表扰动风险。研究指出，重度放牧可导致优势多年生牧草的消亡，并引发地表裸露或一年生植物的短暂替代（Lulandala et al., 2022）。北方荒漠草原区尤为明显：轻度放牧或围封区域能够相对维持生态平衡，而重度放牧区域则表现出持续退化趋势。此外，靠近水源与定居点的区域因牲畜密集活动，植被覆盖呈现明显下降趋势，并在其外围形成了扩张性的退化像元，最终影响整个生态系统的空间结构与生物地球化学循环效率（Jaschke et al., 2020）。

放牧干扰进一步触发了连续退化像元的扩散，导致土地生态服务功能普遍衰退（图 1-2），破坏了生物地球化学循环效率，降低了区域生态系统的整体稳定性。同时，不合理的水资源利用和农业开发也加剧了生态系统的脆弱性，尤其是在基础设施薄弱、生态调控能力有限的背景下，乌珠穆沁沙地面临着土地退化、生物多样性丧失、沙漠化蔓延、水资源日益枯竭等多重环境风险。这些问题不仅对自然环境构成了持续威胁，也严重影响了当地居民的生产生活条件与区域社会经济的可持续发展。



图 1-2 乌珠穆沁沙地植被覆盖情况

因此，推进乌珠穆沁沙地的生态修复与功能重建已成为当前亟须解决的核心任务。应从以下几个方面加强治理：一是加大土地退化治理力度，通过植被恢复、草原封育、封沙育草等措施阻止沙化蔓延；二是优化水资源配置，强化地下水保护，推进水生态系统的恢复与建设；三是实施科学的牧草管理制度，建立分区轮牧与动态放牧机制，避免草原长期过载利用；四是加强对旅游开发与农业生产活动的规划与监管，防止无序扩张对生态系统造成二次破坏；五是注重文化挖掘与基础设施建设，在确保生态安全的基础上提升旅游吸引力与区域发展潜力。

1.2.2 生态治理的科学性反思与优化路径

乌珠穆沁沙地位于干旱半干旱生态脆弱带，水资源极为匮乏，生态环境承载力有限。近年来，为缓解生态退化趋势并提升区域生态功能，当地开展了多项生态治理工程。然而，从水资源利用效率与景观生态协调性两个维度来看，部分工程在科学规划与系统治理方面仍存在明显不足，亟须进行系统性审视与优化调整。

（1）水资源利用失衡问题凸显

乌珠穆沁沙地的治理工程在实施过程中未能充分考虑区域水资源的极端稀缺性。大量灌溉、湿地营造与人工植被引入等措施，虽在短期内改善了局部生态环境，却造成了对有限水资源的过度依赖，甚至在一定程度上引发了水资源紧张和潜在的区域性用水冲突。这种超出区域水文承载力的生态建设方式，不仅难以长期维系，也可能削弱整体生态系统的稳定性。因此，亟须在生态修复前期强化水资源本底调查与承载力评估，严格坚持“以水定绿、以水定型”的治理准则，实现水资源的科学配置与可持续利用。

（2）区域景观特征的弱化与生态均质化风险

乌珠穆沁沙地原本以典型的沙地景观和天然草原生态系统为特征，具有独特

的地貌与生物多样性价值。然而，在治理实践中，部分工程过度强调植被恢复与地表封固，片面追求绿化面积的扩张，忽视了对原生景观的保护，致使局部区域景观类型趋于单一化，沙地生态独特性被削弱，景观异质性降低。这种人为改造下的景观同质化趋势，不仅影响生态系统功能的完整性，也削弱了其文化与生态识别度。因此，治理策略应在强调植被恢复的同时，注重沙地原貌与自然过程的保护，构建多样化、原真性强的景观格局，实现治理目标与地域特色的有机统一。

（3）构建以草原修复为核心的科学治理体系

从根本上看，乌珠穆沁沙地的生态修复应坚持以草原系统修复为核心路径，遵循“以水定林、以水定草”的基本原则，综合考虑水资源约束条件与土壤水分承载力，合理控制乔、灌木引种规模，避免造成植被水耗过大而引发的生态退化。同时，应加强区域治理方案的科学论证与多部门协同决策，结合水文地质条件、土壤特性和气候因素，制定因地制宜、动态调控的生态恢复规划，确保治理工程在可持续性上实现协同提升。

总而言之，乌珠穆沁沙地生态治理必须落实以新发展理念引领高质量发展，强化科学评估、精细规划与资源约束意识，真正实现生态功能修复与景观格局保护的双重目标，推动祖国北方生态安全屏障的可持续稳固发展。

1.2.3 综合功能提升的挑战与对策

乌珠穆沁沙地作为典型的风沙活动区，其生态、经济与景观功能尚未得到充分发挥，面临多方面的发展瓶颈，亟须从系统视角出发，推进综合治理与功能提升。

（1）生态功能退化与修复需求

长期以来，该区域受到人类活动扰动和资源不合理开发的影响，生态系统稳定性显著下降。沙化程度严重，植被覆盖率低下，生态服务功能明显退化，生物多样性也遭受较大冲击。为强化生态功能，应在坚持生态优先理念的基础上，推进沙地综合治理与生态系统恢复，优先实施植被重建（图 1-3）、野生动植物栖息地保护及水土保持等关键生态修复措施，从而逐步恢复生态系统的结构与功能。

（2）经济功能弱化与转型挑战

当前，乌珠穆沁沙地的经济活动仍以传统农牧业和初级旅游服务为主，经济结构单一、附加值较低。受限于交通、水利、电力等基础设施的滞后，区域资源优势尚未有效转化为发展动能。为提升经济功能，应加强基础设施建设，完善交

通网络与能源保障系统，同时通过政策引导吸引多元产业投资，发展生态农业、文化旅游、可再生能源等绿色产业，实现从资源依赖型向可持续发展型经济体系的转型。



图 1-3 课题组成员赴当地进行沙障铺设

(3) 景观功能衰退与形象重塑

乌珠穆沁沙地独具特色的沙地景观是其潜在的文化与生态旅游资源。然而，由于人为开发不当与自然环境演变，部分景观受到破坏，原有的地貌形态与视觉美感逐渐消退。景观功能的提升需依托科学规划与景观设计理念，在生态修复中注重与区域整体景观格局的协调，突出沙地与周边山体、水体、森林、草原、农田的多元融合，构建具有地方特色的复合景观系统。同时，应将景观功能与生态效益、经济效益有机结合，推动“输血式”生态改良向“造血式”生态修复转变，协同推进生态治理、产业振兴与文化传承。

综上所述，乌珠穆沁沙地在生态保护、经济振兴与景观塑造方面仍存在显著提升空间。通过系统推进沙地治理与生态保护，夯实基础设施条件，强化景观设计与功能融合，并将其纳入乡村振兴战略与区域协调发展战略之中，方能实现生态环境持续改善、经济高质量发展与区域整体功能全面提升。

1.3 乌珠穆沁草原退化成因与治理研究

乌珠穆沁草原的退化问题复杂,生态承载力面临严峻挑战,且沙化趋势日益加剧,迫切需要采取有效的治理措施。自 20 世纪 50 年代以来,开荒耕种、过度放牧和矿产资源开发等活动对草原生态造成了严重破坏,导致草原退化现象显著,严重影响了当地农业、牧业的发展和生态环境稳定,也使得牧民的经济收入受到一定冲击。研究表明,1983~2005 年,乌珠穆沁草原的草地退化面积从 141.53 万 hm^2 增加至 305 万 hm^2 ,沙化面积也由 4 万 hm^2 增至 8.67 万 hm^2 (萨日盖和张裕凤, 2015; 伊力奇等, 2014; 李清清等, 2013)。此外,2003~2020 年,草地面积呈现一定的波动趋势。多年来,学术界普遍认为,草原退化现象的产生既受到自然因素的影响,也与人为活动密切相关。因此,如何高效治理草原退化和合理利用生态资源,已成为当前亟待解决的重大课题。本书对乌珠穆沁草原退化的原因、主要治理措施等方面现有的结论和研究成果进行了系统的总结与归纳,以期对乌珠穆沁退化草原生态恢复提供理论与相关技术参考。

1.3.1 乌珠穆沁草原退化成因

1.3.1.1 自然因素

(1) 气候因素

气候因素是影响草原生态系统的直接因素,气候的变化导致草原生态系统发生改变,进而加速草原的退化,这一现象也是多年以来学者专家研究的重点。包学明等(2009)学者认为,气候变化使草原植被遭受破坏,地面暴露,下垫面反射系数增加,土壤水分蒸发剧烈,地表变得更为干燥,从而使气候变得越来越干旱。降水量过多会导致牧区洪涝,降水量过少会导致牧区干旱,不管是洪涝还是干旱灾害的发生,都会破坏牧区生态系统的平衡(其乐木格, 2014)。1981~1990 年,乌珠穆沁草原年平均降水量达到 255.8mm,1991~2000 年,年平均降水量达到 281.4mm,2001~2007 年,年平均降水量达到 137.6mm,1981~2007 年,乌珠穆沁草原年平均降水量呈现先略有增加后减少的趋势(图 1-4)。

降水量的减少直接导致了干旱灾害的增加,严重影响了牧草的产量,从而加剧了草原的退化。研究区年平均气温在 1981~1990 年为 1.28°C ,1991~2000 年上升至 1.93°C ,而在 2001~2007 年进一步增加至 2.56°C 。与降水量的趋势相反,年平均气温持续上升,对草原生态系统产生了更为深远的影响。

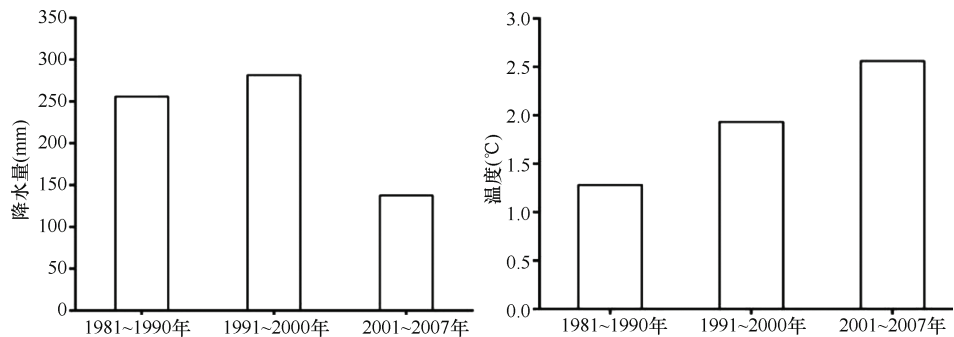


图 1-4 乌珠穆沁草原年平均降水量及温度变化图

陶丽娜（2016）指出，草原生态区风力活动频繁且强度较大，春季大风所造成的损失尤为显著。在东乌珠穆沁旗，每年被风剥蚀的土层厚度可达 10mm 以上。随着风力的增强，表土和沙粒不仅被吹扬，甚至掩埋了部分青草地，这种情况在某些地方还导致了流动沙丘的迁移。李旺（2021）进一步分析称，东乌珠穆沁旗位于半干旱地区，降水的时空分布不均，形成了一个不稳定的气候系统，极易发生旱灾。同时，东乌珠穆沁旗的生态环境非常脆弱，自身的稳定性较差，抵御外界干扰的能力较低。因此在受到外力作用后，草原生态的退化恢复过程将变得困难重重。

(2) 生物因素

除气候因素外，学者普遍认为，虫鼠害也是导致草原严重退化的重要原因。魏利平（2009）认为，草原退化初始出现的鼠虫害，是加速锡林郭勒盟草原退化的重要因素。长期以来，乌珠穆沁草原连年持续干旱及地下水位的不断下降，气候、水分、虫害以及自然灾害，直接作用于土壤和植被，导致草原退化、沙化、荒漠化的趋势不断加剧，为害鼠提供了适生环境，危害逐年加重。最早从 1975 年东乌珠穆沁旗草原布氏田鼠鼠害开始，到 1986 年，布氏田鼠鼠害已遍布全旗 12 个苏木，44 个嘎查，鼠害面积达 100 万 hm^2 ，占当时可利用草场面积的 31%，危害十分严重。由于鼠类繁殖力强、适应性广，当环境条件对其生存和繁殖有利时，其种群数量会在短期内迅速增长，并大量啃食其赖以生存的牧草及其他植物，使草场遭到严重破坏。东乌珠穆沁旗干旱缺水问题日益严重（胡永祥等，2006），给草原生态环境带来了严重影响，为鼠害发生创造了有利的条件，加剧了草地植被退化，使草地生态环境进入恶性循环，最终形成沙化。

1.3.1.2 人为因素

(1) 过度放牧

除了自然因素，人为因素对草原退化的影响更加直接且显著。李金花等（2004）