

阿拉善高原生态环境退化研究进展

万 炜^{1,2}, 颜长珍¹

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 区域生态环境退化问题是当前研究的热点内容, 分析其研究现状及存在问题能更好地把握其核心领域并开展更进一步的研究。本文以典型生态环境脆弱区——阿拉善高原为研究对象, 系统梳理了该区域土地沙漠化、沙尘暴演化、土地利用/覆被变化、绿洲退化、水量减少与水质恶化等与生态环境退化相关领域的研究进展。在分析已有研究成果的基础之上, 就不同生态环境退化问题研究存在的不足进行了归纳总结, 并提出了今后需要重点开展的研究内容, 以期为阿拉善高原乃至其他生态环境脆弱区生态系统的研究提供参考。

关键词: 生态环境退化; 人地关系; 阿拉善高原; 干旱区; 综述

Research progress of eco-environmental degradation in Alxa Plateau

WAN Wei^{1,2}, YAN Changzhen¹

1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Background, aim, and scope The issue of regional eco-environmental degradation is one of the hot topics of current researches. We can better grasp the core field concerning the eco-environmental degradation and carry out further studies through analyzing its research status and existing problems. **Materials and methods** We chose the Alxa Plateau, a typical ecological fragile area, as the research case and systematically reviewed the land desertification, evolution of sandstorms, land use/cover change, oasis degradation, the decrease of water flow, deterioration of water quality and other related research filed progress in terms of eco-environmental degradation in Alxa Plateau. **Results** (1) In the aspect of land desertification issue, how to distinguish between the contribution of natural and humanistic driving factors to the desertification, and quantitatively analyze the driving mechanisms of humanistic factors (e.g. the development of farming and grazing, ecological immigration, regulations and policies) in desertification still remains unclear. (2) With respect to the sandstorms, only limited studies investigated the

收稿日期: 2017-07-28; 录用日期: 2017-11-27

Received Date: 2017-07-28; **Accepted Date:** 2017-11-27

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0501001); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429901); 国家自然科学基金面上项目(41171400)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0501001); National Basic Research Program of China (2013CB429901); National Natural Science Foundation of China (41171400)

通信作者: 万 炜, E-mail: wanwei@lzb.ac.cn

Corresponding Author: WAN Wei, E-mail: wanwei@lzb.ac.cn

引用格式: 万 炜, 颜长珍. 2018. 阿拉善高原生态环境退化研究进展 [J]. 地球环境学报, 9(2): 109–122.

Citation: Wan W, Yan C Z. 2018. Research progress of eco-environmental degradation in Alxa Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(2): 109–122.

coupling relationship between sandstorms and the degradation of ecological environment, the trend and forecast of sandstorms development under the background of global warming and the engineering measures for preventing the sandstorms. (3) It is urgently needed to enhance the research about the microcosmic mechanism of ecological environment degeneration induce by the unreasonable land use types and the interaction between land cover change and the effect of ecological environment. (4) The primary cause of the degradation of the oasis in Alxa Plateau is that the soil and water resources have not been well developed. Therefore, we should make the limited water and soil resources distributed and utilized rationally and minimize ineffective dissipation and losses in oasis through quantitatively analyzing the ecological water demand in oasis, optimizing the cultivation patterns and providing the relative engineering and management measurements. (5) The water resources endowment in Alxa Plateau is limited by its natural environment. The institution of water allocation in Heihe River basin is the principal approaches to guarantee the water flow of Ejina River basin. And there are not appropriate approaches to solve the key ecological environmental degradation problems that excessive exploitation and the destruction of groundwater resources, which could lead to the decrease of the underground water level and continuous deterioration of water quality. Thus, it is urgently necessary to deal with these problems in terms of water resources. **Discussion** In order to fundamentally mitigate the increasingly tense man-land relationship and to restrain the degradation of ecological environment, related engineering and policy should be carried out, which can strengthen the protection of ecological system and the natural environment. Consequently, the restoration and rebuild can be acquired in ecological system of fragile zone. **Conclusions** The major eco-environmental degradation problems present in the Alxa Plateau are interacted and coupled. In addition, the background factor of ecological environment degradation is the fragile natural environment (climate change, limited water resources), but the main driving factor of that is the inconsistency of man-land relationship due to the irrational human activities have effects on the fragile ecological system. **Recommendations and perspectives** The studies about the ecological environment degradation in Alxa Plateau, including land desertification, sandstorms, land use/cover change, oasis degradation, reduction of water flow and deterioration of water quality, have acquired remarkable progress and achievements. However, there are still some scientific problems to be solved or further investigated. We summarized the shortages of studies regarding the eco-environmental degradation and suggested the research contents that need special focus on in the future, on the basis of analysis related to existing research results. Additionally, we hope the results of this study may provide the references for the study of ecosystems in Alxa Plateau and even other weak ecological environment areas.

Key words: eco-environmental degradation; man-land relationship; Alxa Plateau; arid regions; review

随着人口压力的不断增大与社会经济的迅速发展，资源 - 环境 - 生态的可持续发展已成为社会关注的热点。生态环境退化作为人们当前面临的重大科学问题，已引起国内外学者的广泛关注（Tucker, 2000; Wang et al, 2008; Wang, 2009; Baranovitch, 2016; Graf et al, 2016）。生态环境退化（eco-environmental degradation）是指由于自然或人为原因而造成的生态系统结构破坏、功能衰退、生物多样性减少、生物生产力下降以及土地生产潜力衰退、土地资源丧失等一系列生态环境恶化的现象（郑昭佩, 2011）。

在国际上，1972年联合国人类环境会议组织编写了《人类环境宣言》，并提出了“只有一个地球”

的口号（余谋昌, 1991）；同年，罗马俱乐部发表《增长的极限》研究报告（金燕, 2005），从而引起了学术界对生态环境退化的广泛重视。1980年，国际自然及自然资源保护联盟（IUCN）基于遏制生态环境退化的目的，公布了《自然资源保护大纲》文件（Bridgewater and Phillips, 1996）。1983年，联合国成立世界环境与发展委员会（WCED），并于1987年发表《我们共同的未来》报告，提出了“可持续发展”的理念（Dow, 1992）。1992年，联合国环境与发展大会通过并签署了《里约环境与发展宣言》、《二十一世纪议程》等文件（郭日生, 2012），指出各国应有效开展合作，尽可能地防治生态环境退化问题。另外，自20世纪60

年代以来, 陆续有诸如国际生物计划 (IBP, 1964 年)、人与生物圈计划 (MAB, 1971 年)、国际地圈-生物圈计划 (IGBP, 1986 年)、国际全球环境变化人文因素计划 (IHDP, 1996 年)、第三极环境研究计划 (Third Pole Environment, 2009 年)、未来地球计划 (Future Earth, 2014 年) 等组织, 逐步把与生态环境退化相关的问题提上了研究日程 (孙鸿烈等, 2014; Lahsen, 2016)。

中国关于生态环境退化方面的研究, 可追溯到南宋时期, 陈旼在其著作《农书·粪田之宜篇》中就已定性提出了由于过度垦殖所导致土地退化的问题 (万国鼎, 1965)。2000 年前后, 中国科学院相关研究所组织科研人员从不同角度、依据不同指标, 就生态环境退化的问题, 开展了全国尺度上的诸如土地退化及整治 (郑度, 1999)、生态环境敏感性 (欧阳志云等, 2000)、生态退化 (刘国华等, 2000)、生态环境胁迫 (苗鸿等, 2001)、生态区划 (傅伯杰等, 2001) 等相关领域的研究。此后, 陆续有学者从不同的地域单元 (袁晓波等, 2015; 周云轩等, 2016)、流域 (马玉寿等, 2016; 徐艳红等, 2017)、县域 (霍擎等, 2011; 王华伟等, 2011) 等空间尺度对生态环境退化问题进行了研究。

近几十年来, 中国的生态环境脆弱区 (如农牧交错带 (牛文元, 1989)、沙漠边缘带 (李克煌和钟兆站, 1995)) 生态退化问题十分严峻。阿拉善高原相对恶劣的自然环境决定了其生态系统发育较为脆弱; 在自然与人为因素的共同作用下, 出现了一系列生态环境退化问题。本文通过对国内外相关研究进行系统的梳理与总结, 分析阿拉善高原生态环境退化研究的进展与存在的问题, 以期为该区域乃至其他生态环境脆弱区生态系统的恢复及治理提供相关依据。

1 阿拉善高原自然环境概况

阿拉善高原位于内蒙古高原最西端的阿拉善盟, 东抵贺兰山, 西至马鬃山, 南达腾格里沙漠南缘, 北与蒙古国接壤, 地理坐标为 $37^{\circ}24' - 42^{\circ}47'N$, $97^{\circ}10' - 106^{\circ}53'E$, 面积 $23.69 \times 10^4 km^2$ 。阿拉善高原沙漠、戈壁广泛分布, 境内有巴丹吉林、腾格里以及乌兰布和三大沙漠。而据历史地理学家侯仁之对该区域的考察研究发现, 如今阿拉善高原许多沙漠覆盖的区域, 在汉代发育了诸多城镇, 在当时是边塞重要的农垦、军屯区 (侯仁之和俞伟超,

1973; 侯仁之, 1982)。阿拉善高原整体位于西北干旱区, 且又与青藏高原、黄土高原毗邻, 从生态地理区域系统的角度来看 (郑度, 2008), 该区域是中国重要的生态地理单元 (图 1)。

阿拉善高原地貌呈现西南高、东北低的趋势, 平均海拔 900—1400 m, 最低处位于额济纳旗北部的居延海区域, 最高处位于贺兰山主峰达郎浩绕。从该区域土地覆被状况来看: 地表覆被以沙漠、戈壁为主, 草地次之, 而林地、耕地、湿地及人工表面的面积则较少 (图 1)。气候类型上, 阿拉善高原属中温带大陆性非季风气候。境域干旱少雨, 风力强劲, 蒸发量大, 昼夜温差大, 季节变化明显。年均气温 $6.8 - 8.8^{\circ}C$, 雨季集中在 7—9 月, 年降水量仅 40—200 mm。阿拉善高原是几条强冷空气的主要交汇处, 大风日数多, 极易形成沙尘暴天气。境内的两条主要河流分别是黄河与额济纳河 (黑河下游)。额济纳河分东西两支, 西支称木仁高勒, 最终注入嘎顺淖尔 (亦称西居延海); 东支称额木纳高勒, 最终注入苏泊淖尔 (亦称东居延海)。而由于人类活动的不断增强, 特别是黑河中游大力发展人工绿洲, 农业灌溉占用了大量水资源, 致使额济纳河流域生态用水大幅减少, 尾闾湖逐渐萎缩。总体上看, 阿拉善高原地带性土壤包括灰钙土、灰漠土、灰棕漠土; 植被类型可划分为荒漠植被、绿洲植被、山地植被。由于阿拉善高原深居内陆, 降水稀少, 植被旱生化现象明显。但因贺兰山的存在, 极大地丰富了阿拉善高原植物区系的多样性与复杂性。贺兰山区集中分布着大面积针叶林, 是内蒙古西部最大的天然次生林区; 阿拉善高原另外一个主要林地覆盖区位于额济纳绿洲, 生长着典型荒漠区天然胡杨林。

2 阿拉善高原主要生态环境退化研究现状

阿拉善高原作为西北干旱区的缩影, 相对恶劣的自然环境决定了其生态系统发育较为脆弱; 且由于当今人口的增长、不合理的农牧活动、工矿业掠夺式开发等人为因素的叠加, 导致该区域面临沙漠化土地扩张、沙尘暴频发、植被退化、绿洲萎缩、地下水位下降、水质恶化等一系列生态环境退化问题。

2.1 土地沙漠化及驱动机制

生态环境退化的研究内容主要以土地退化为主 (章家恩和徐琪, 1997), 而西北干旱区土地

退化的主要形式表现为土地沙漠化。沙漠化主要是由不合理的人类活动与脆弱的生态环境相互作用所造成的，其最终结果表现为土地生产力下降、

生态系统稳定性降低、地表呈现类似沙漠景观的土地退化（王涛和赵哈林，2005）。阿拉善高原土地沙漠化及驱动机制如图2所示。

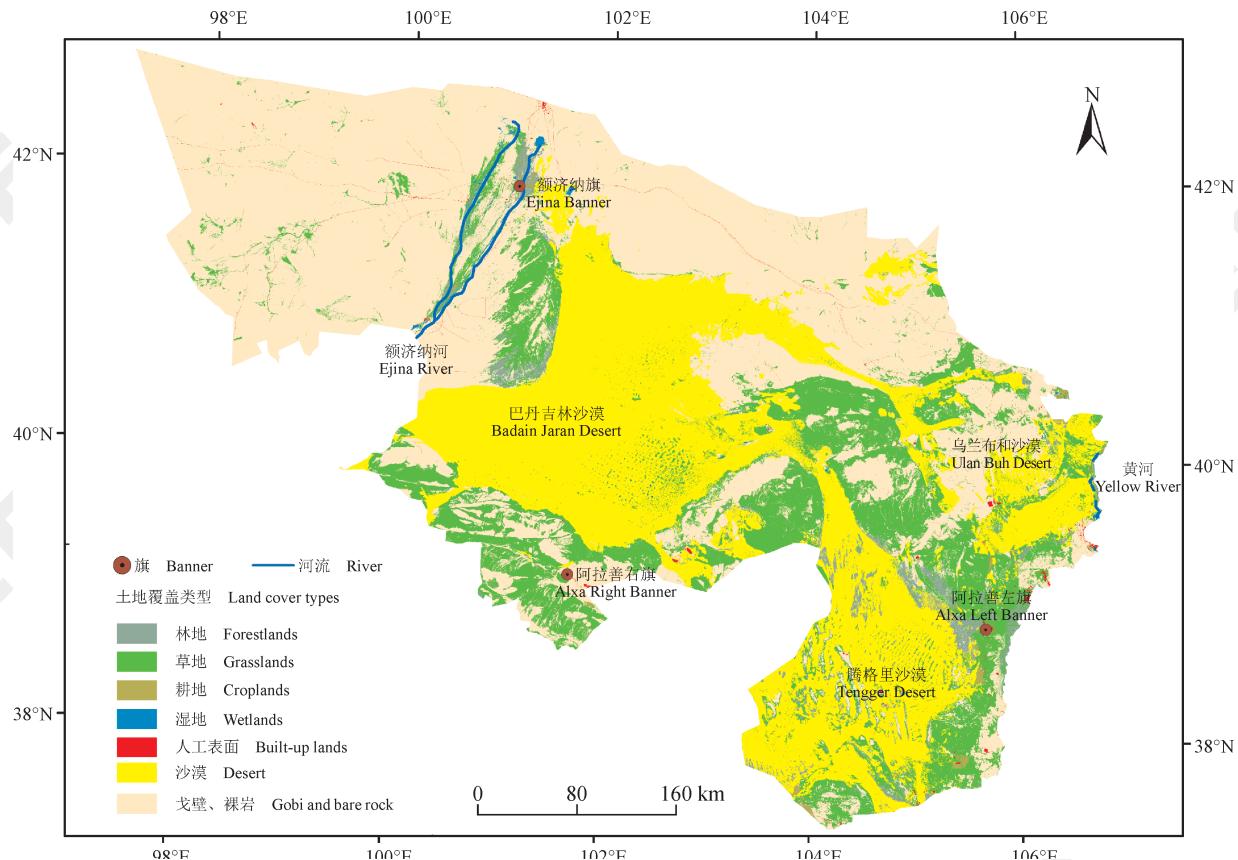


图1 阿拉善高原区位与土地覆被现状图
Fig.1 Location and land cover map of Alxa Plateau

阿拉善高原内的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠与乌兰布和沙漠在第四纪时期就已基本形成，该区域土地沙漠化是人类活动在自然环境的基础上综合作用的产物。即脆弱的生态环境是沙漠化发生的背景因素，而人地关系的不相协调是造成沙漠化的主要因素。诱发沙漠化的自然条件中，气候因素（气温、降水、风速）占主导，而根据李春筱（2013）、史培军等（2014）、梁圆等（2016）的相关研究表明：近几十年来，阿拉善高原年平均风速及年最大风速呈减小的趋势，且气候条件趋向暖湿的方向发展，即该区域自然条件并非是导致沙漠化的主要原因。何磊等（2015）基于遥感影像数据分析了阿拉善高原沙漠化过程及自然与人为驱动因素，研究结果也表明，人类活动才是造成阿拉善高原沙漠化的主导因素。总

体而言，人类活动对沙漠化的过程起到加速的作用，呈负环境效应；但近几年来诸如退耕还林还草、三北防护林、生态移民等工程的实施，对局部区域沙漠化的逆转起到促进作用，呈正环境效应。另外，已有研究从不同的时间尺度对阿拉善高原沙漠化进行了分析。陈晓龙（2014）通过对阿拉善高原风沙地貌进行地层分析与光释光测年，研究了2 ka以来的沙漠化演化过程，结果表明：2 ka以来，特别是距今0.1 ka以来阿拉善高原风成沙大范围堆积，其风沙地貌景观是大尺度暖干化气候背景下人类活动不断加剧所造成的。Wang et al (2013) 通过Landsat遥感影像数据研究了1975—2007年阿拉善高原沙漠化的时空演化过程及其驱动力。此外，还有学者对额济纳绿洲（李森等，2004）、巴丹吉林沙漠边缘区（朱金峰，

2011) 等小尺度沙漠化过程进行了研究。除了分析沙漠化过程与驱动力外, 不少学者研究了阿拉善高原沙漠化的环境效应。赵雪等(2004)分析了额济纳绿洲沙漠化对柽柳群落影响, 结果表明: 沙漠化所导致的环境恶化造成了植被衰退、生物

量下降、土壤退化、柽柳群落朝多元方向发生次生演替等现象。康秀亮(2008)研究了额济纳旗沙漠化胁迫对胡杨、红砂、梭梭、柽柳和蒙古沙拐枣等5种典型植被的敏感性, 并提出了相应的植被恢复措施。

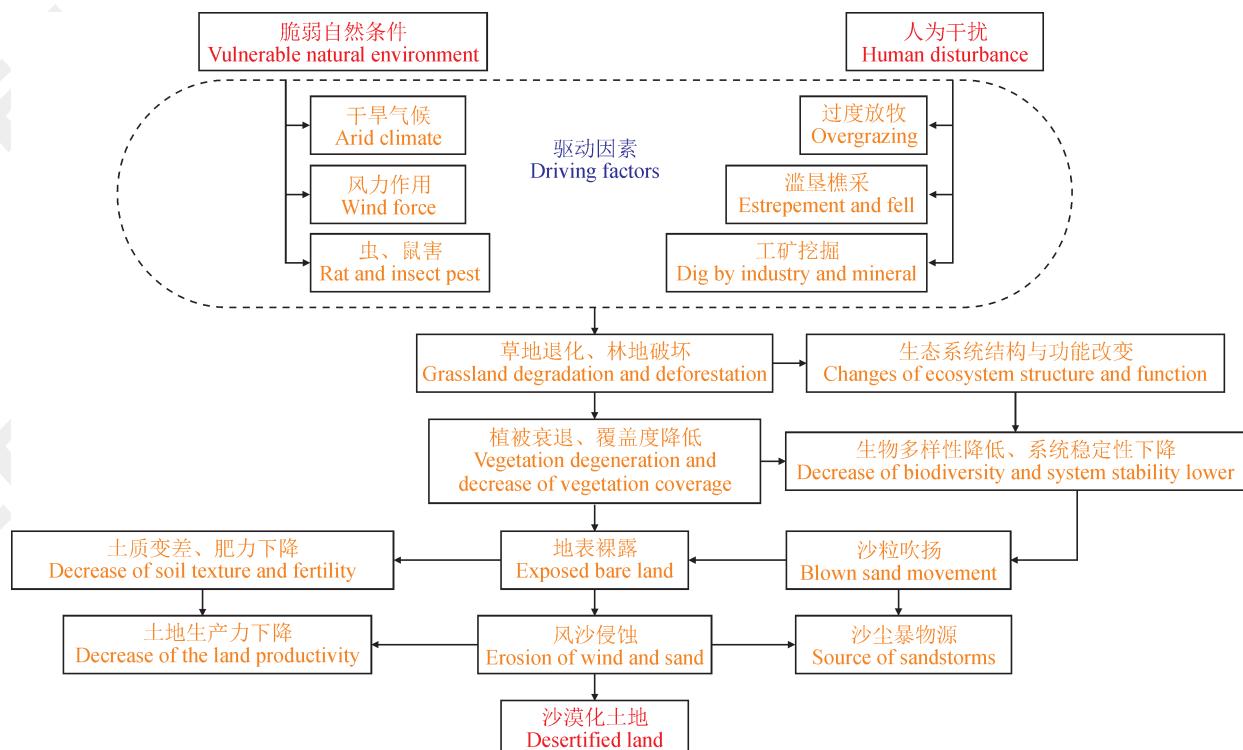


图2 阿拉善高原沙漠化驱动机制示意图
Fig.2 Driving mechanisms of aeolian desertification in Alxa Plateau

2.2 沙尘暴时空演化与成因

姚正毅等(2008)研究表明, 由于阿拉善高原生态环境的持续恶化及其地域单元的特殊性:

(1) 该区域是三条冷空气路径的交汇处, 具备沙尘暴发生的强劲动力源; (2) 大面积沙漠与干涸湖盆分布其中, 给沙尘暴提供充足物源; (3) 人类活动的不合理加剧了沙尘暴发生的可能。从而导致阿拉善高原现已成为中国四大主要的沙尘暴策源地之一(王涛等, 2001)。可见, 阿拉善高原的沙尘暴问题亦是该区域生态环境退化研究的重要内容, 该区域沙尘暴形成演化机制如图3所示。

成格尔等(2010)的研究表明: 地表下垫面持续恶化所导致的土地沙漠化与沙尘暴发生关系密切; 植被覆盖度的增加对沙尘暴的抑制作用明显;

且戈壁地表不利于沙尘暴的发生。另外, 学者们在气候因子与沙尘暴发生及变化规律的关系方面做了大量研究, 结果表明: 空间上, 阿拉善高原沙尘暴的分布规律以拐子湖地区为中心向周围方向递减(董智等, 2008; 李亚飞等, 2008), 且高原北部与东部沙尘暴发生频次多于西部与南部(董智等, 2008); 时间上, 20世纪70年代沙尘暴发生频次最多, 之后呈现逐渐减少的趋势, 到20世纪90年代又呈现波动增加的趋势(尤莉等, 2004), 且一年之中春夏两季沙尘暴多发, 而秋冬季频次较少(董智等, 2008); 成因上, 沙尘暴与地表植被覆盖度(李亚飞等, 2008)、年降水量(成格尔, 2007)呈显著负相关, 与大风日数(成格尔, 2007; 董智等, 2008)呈显著正相关, 而与年均温(成格尔, 2007)呈弱负相关。关于沙尘暴物源

方面的研究,岳乐平等(2004)通过对古居延海干涸湖盆沉积物的粒度组成进行了分析,研究发现:干涸湖盆的地表湖相沉积物大部分粒径小于10 μm,在风暴条件下可横扫整个东亚北部地区,

是沙尘暴的主要物源。另外,姚正毅等(2008)认为:人类活动破坏地表植被和土体结构、采矿业增加的工业粉尘,亦对沙尘暴的物源做出了适当贡献。

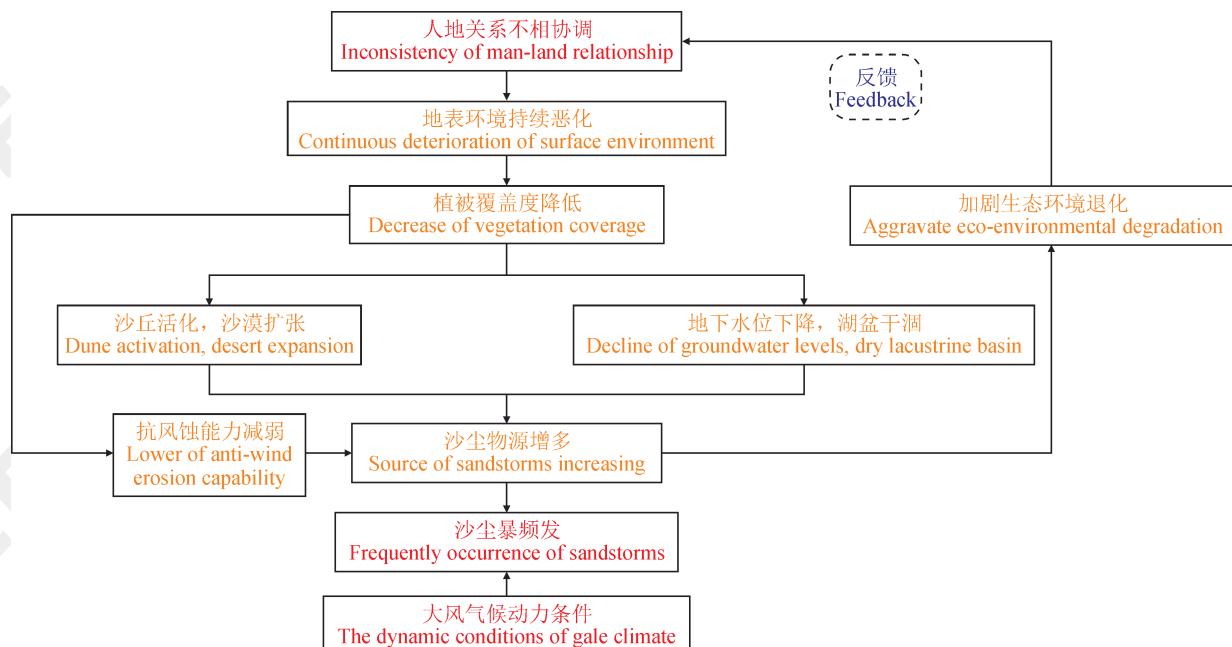


图3 阿拉善高原沙尘暴形成示意图
Fig.3 Evolution process of sandstorms in Alxa Plateau

2.3 土地利用 / 覆被变化及驱动机制

土地利用 / 覆被变化 (LUCC) 是自然过程与人文过程相互耦合、交互作用最为密切的环节之一,能够很好地体现人类活动对生态环境变化的影响(Meyer and Turner, 1994)。阿拉善高原西北部的额济纳河沿岸绿洲带、北部东西向梭梭林带以及东部贺兰山天然次生林带,共同构成了该区域的生态屏障,是西北地区重要的生态防线(龚家栋, 2005)。然而人们不合理的土地利用方式所引发的诸如植被退化、绿洲萎缩、沙漠扩张等土地覆被状况变差的现象,直接导致了阿拉善高原生态环境退化的问题。

Pei et al (2008)为探究禁牧对阿拉善高原草场生态环境退化的影响,以三组样地(分别为放牧一年土地、禁牧两年土地以及禁牧六年土地)进行对比研究,分析其土壤与植被的性质,结果表明:限制放牧可明显改善当地的土壤肥力,植物的多样性、覆盖度及生物量。王涛等(2008)

分析了1975—2006年阿拉善高原各土地利用类型的动态变化,结果表明:农田与建设用地面积有明显增加,分别达307.80 hm²与156.71 hm²,说明人们对土地利用的强度在不断增大。成军锋(2010)对乌兰布和沙漠及周边地区1985—2004年的土地利用 / 覆被变化做了监测研究,结果表明:未利用土地的总面积不断增加,且斑块逐渐变大,这对沙漠化的治理越来越不利;整个研究区土地利用变化较小,而在局部地区变化很大,从侧面反映了人类活动对局部区域的土地利用具有强烈影响;草地向未利用土地(沙漠、戈壁、裸土等)大量转化,说明荒漠化在加剧;绿洲地区的盐碱地不断增加,即土地盐碱化程度加重。从宏观尺度上看,近几十年阿拉善高原土地覆被状况是先恶化、后逐渐好转的,如谢家丽等(2012)通过研究发现,阿拉善高原绿洲面积变化呈现先减少后增多的趋势。近年来土地利用结构的好转使阿拉善高原生态环境问题得到一定的缓解,但社会经济发展与

生态环境保护的协调度不高, 生态环境退化问题依旧严峻(丁涛等, 2011)。

阿拉善高原土地利用方式虽然总体上以负环境效应为主, 但亦有正环境效应的例子。郭巧玲等(2010)分析了黑河分水前(1987—2000年)与分水后(2000—2009年)额济纳绿洲天然植被覆盖的动态变化, 结果表明: 黑河下游得到分水补给后, 绿洲植被退化得到明显遏制, 部分区域绿洲植被恢复良好。红古乐詠拉(2016)的研究也表明, 近年来阿拉善梭梭公益林的建设使局部地区植被覆盖度增加, 这对降低风速、防治土地沙漠化与沙尘暴具有明显的作用。然而, 人类活

动作用于土地利用方式所产生的生态环境效应是复杂、动态的。如理论上通过禁牧与生态移民可使阿拉善高原生态环境退化区的植被得到恢复与改善(Pei et al, 2008), 而实际上: 禁牧会导致草原鼠害增加、火灾风险加剧, 以及出现灌木因长期缺乏啃食而退化、不利于草场更新等问题; 生态移民工程的实施又将加重移民迁入区的生态承载负担(万炜和张爱国, 2014), 从而造成因过度开垦而导致的土地沙漠化、地下水位下降及土壤盐碱化等问题(戴新刚等, 2012)。阿拉善高原土地利用/覆被变化与生态效应之间的耦合关系如图4所示。

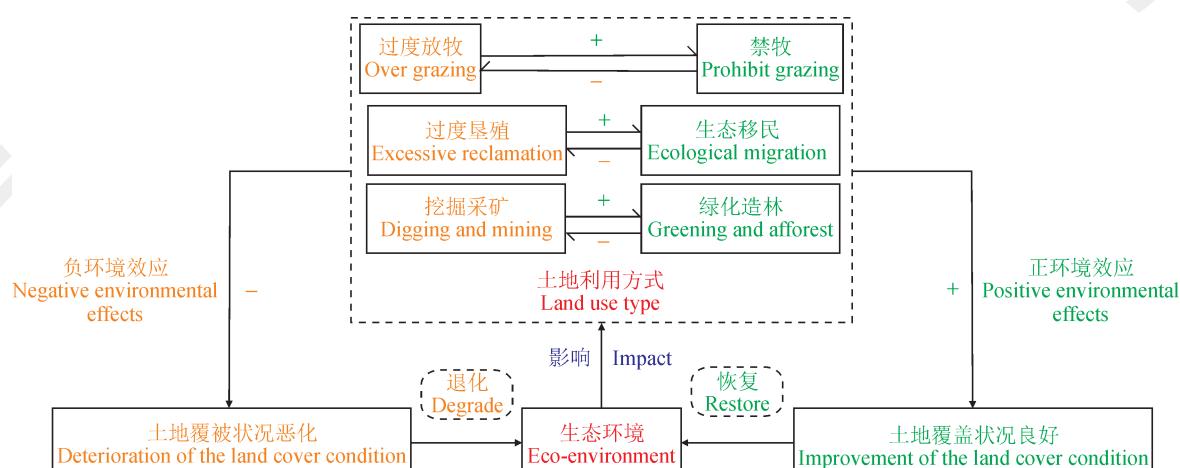


图4 阿拉善高原 LUCC 与生态环境的耦合关系
Fig.4 Coupling relations between LUCC and ecological environment in Alxa Plateau

2.4 绿洲退化及驱动机制

绿洲作为西北干旱区一种独特的生态地理景观, 其生态环境的敏感性较高。阿拉善境内的阿拉善左旗与额济纳旗均有较大面积的绿洲分布, 阿拉善高原绿洲总面积达 3396.72 km^2 (谢家丽等, 2012)。额济纳绿洲位于中国西北第二大内陆河——黑河的下游, 其中、上游来水是维系额济纳绿洲最重要的水源。而由于黑河来水量的减少及季节性断流现象的发生, 致使该区域植被退化问题严重, 成为阿拉善高原绿洲退化研究的热点区域。

马燕等(2010)通过钻取额济纳旗境内的高分辨率湖泊沉积物, 反演了额济纳绿洲近200年来的环境变化, 研究表明: 人类活动导致了黑河水系不断溯源退缩, 额济纳绿洲相应退化, 荒漠化不

断加剧, 东、西居延海亦逐步缩小。格日乐等(2006)通过建立系统动力学模型, 预测了未来20年额济纳绿洲的土地承载力变化, 研究结果显示绿洲土地将处于严重超载状态。高冠龙等(2015)对1987—2008年以来的额济纳绿洲土地覆被变化进行了研究, 结果显示: 1987—1999年, 绿洲植被呈退化趋势, 而2000年黑河分水以后, 绿洲退化趋势得到缓解; 通过对绿洲退化的驱动力进行主成分分析表明, 额济纳绿洲的土地覆被变化主要受人类活动的影响, 地表径流、气候状况、地下水条件等因素对绿洲变化亦有不同程度的影响。王旭东等(2009)对额济纳旗1957—2007年以来的气象参数进行了研究, 结果表明: 1957—2007年以来, 额济纳绿洲干旱化趋势明显, 即在此背景下, 额济纳旗生态环境将面临着更大的压力。除了研

究绿洲退化过程以外，近年来学者们进一步对绿洲变化所引起的环境效应做了大量研究。席海洋等（2011a）研究了额济纳绿洲不同植被覆盖下土壤特性的时空变化，结果表明：戈壁地表条件下的土壤差异性最为显著；不同植被类型下的土壤含水量变化差异明显；土壤类型及结构的差异又会影响绿洲植被的生长和分布。鱼腾飞等（2011a, 2011b）通过对额济纳绿洲植物群落进行研究，结果显示：荒漠绿洲植物群落的结构简单、组织水

平低；物种各多样性指数沿河流方向的格局变化明显，以绿洲为核心向东、西戈壁及沙漠腹地递减。与绿洲退化相逆的过程称绿洲化，是指在干旱区人与自然因素共同作用下荒漠向绿洲转变的过程（赵文智等，2016）。可以看出，绿洲退化的最主要原因是流域内水土资源的过度开发利用，而黑河分水政策的实施对额济纳绿洲的恢复（绿洲化）起到决定性作用。人类活动与绿洲退化（荒漠化）及绿洲化三者之间的关系如图5所示。

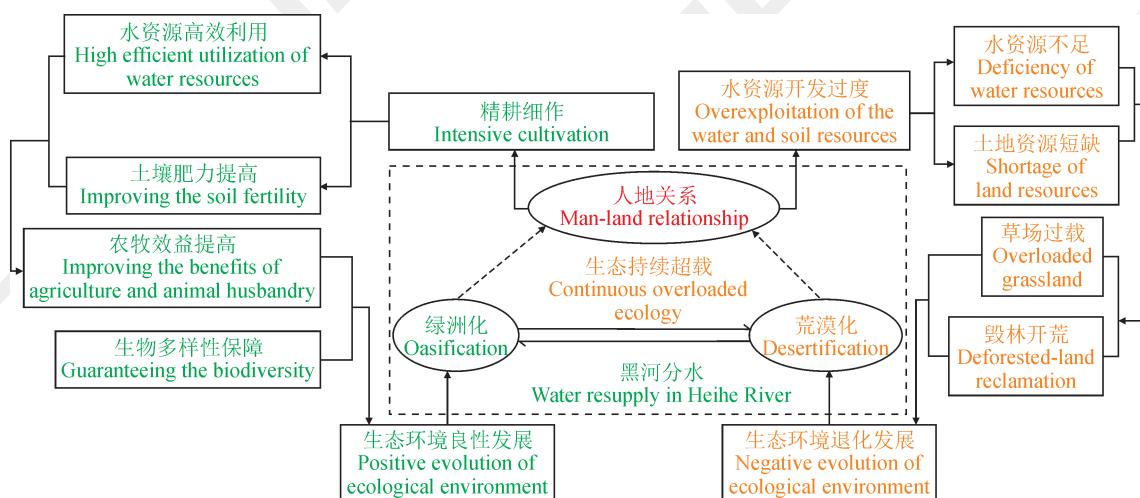


图5 阿拉善高原人类活动与绿洲退化及绿洲化关系示意图
Fig.5 Relationship between human activities and oasis degradation/oasification in Alxa Plateau

2.5 水量减少与水质恶化

阿拉善高原地处亚洲大陆腹地、内蒙古高原的最西端，大陆性气候十分明显。且由于阿拉善高原位于200 mm等降水量线以西，为干旱气候区。因此，水资源短缺是制约阿拉善高原生态恢复的主要因素。阿拉善高原境内的主要河流为黄河与额济纳河：黄河自南而北流经阿拉善高原最东端，过境流程仅85 km；黑河流出正义峡后进入阿拉善高原，被称为额济纳河，属于黑河的下游，河流两岸发育形成了额济纳绿洲，是额济纳旗主要的人口聚居地。中上游来水除蒸散发外，大部分被绿洲灌溉及人畜消耗，一部分形成地下水并与地表发生迁移转化，地表径流最终流向东、西居延海（图6）。

景爱（1994）通过对额济纳河下游进行考古研究，发现该区域在汉、唐、元等朝代均是边疆重要的农垦、军屯区，而随着人们的长期垦殖以及自然环境的变迁，逐渐出现了河流水量减少、

湖泊萎缩、沙漠面积逐渐扩大等现象。到20世纪60年代，甚至一度出现额济纳河断流、居延海彻底干涸的问题。直至2000年政府实施黑河分水政策以后，额济纳河流域的河湖水量才陆续得到恢复（廖杰等，2015）。另外，阿拉善高原作为中国西北典型的干旱区域，大气降水及地表径流是相当有限的，水资源主要赋存于地下，即本区域地下水与植被生长、植物种群演替以及绿洲的存亡有着密切关系（钟华平等，2002）。因此，关于阿拉善高原地下水水量、水质方面的研究亦是当前研究的热点。席海洋等（2011b）分析了1988—2006年以来额济纳盆地地下水的变化特征，结果表明：地下水位自20世纪40年代开始整体上呈不断下降的趋势，而随着近年来河道输水量的增加，潜水水位得到回升，但深层承压水水位仍呈现持续下降的态势。师伟（2007）、彭翠华（2007）以阿拉善高原的腰坝绿洲区为研究对象，

发现地下水超量开采导致了一系列的生态环境退化问题,主要包括地下水位持续下降、水质恶化、土壤盐渍化加剧、生态林大面积枯死以及在局部地区出现地面沉降及地裂缝;且水质恶化的最主要原因是人类长期过量开采地下水,导致绿洲西

南部高矿化度咸水入侵而造成的。另外,姜凌等(2009)研究发现,在气候变化和高强度人类活动的影响下,绿洲地下水的水动力条件逐渐变差,高盐分离子逐渐富集,易溶盐累积,水体总体朝咸化方向发展。

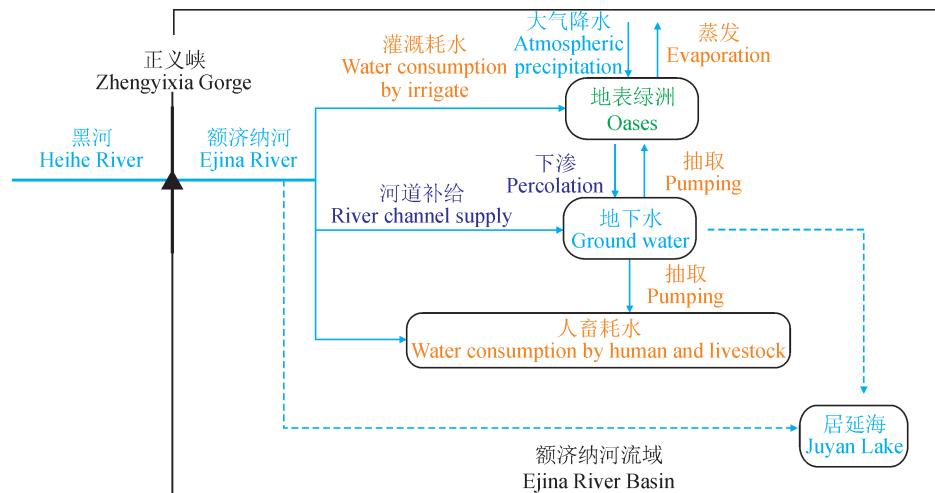


图6 阿拉善高原额济纳河流域主要水文过程
Fig.6 Main hydrological processes of Ejna Basin in Alxa Plateau

3 研究存在的主要问题与展望

阿拉善高原地区的土地沙漠化、沙尘暴发生、土地利用/覆被变化、绿洲退化、水量减少及水质恶化等与生态环境退化相关的研究已经有了显著的进展,取得了较为丰硕的成果,但仍然存在一些尚需深入研究或亟待解决的科学问题。

3.1 主要问题

(1) 已有土地沙漠化问题的研究,主要是对阿拉善高原不同尺度的土地沙漠化时空演化过程进行分析,并在此基础上探讨沙漠化的驱动力与环境效应。但如何区别自然与人文驱动因素对沙漠化的贡献、定量分析人文因素(如农牧发展、生态移民、法规政策)对沙漠化的驱动机理,是当前研究的主要短板。

(2) 关于阿拉善高原沙尘暴方面的研究,学者们主要从沙尘暴的成因、沙尘暴发生的气候条件、沙尘暴时空分布规律、沙尘暴的物源等方面展开。而在沙尘暴与生态环境退化之间的耦合关系、全球变暖气候背景下沙尘暴发展的趋势及预测、沙尘暴防治的工程措施等方面,缺乏明确的

应对研究。

(3) 目前学者们较多研究阿拉善高原土地利用/覆被变化直接引起的生态环境变化,而关于不合理的土地利用方式所导致生态环境退化的微观机理、土地覆被变化与生态环境效应之间的相互作用关系等方面,则鲜见报道,仍有待加强研究。

(4) 阿拉善高原绿洲退化根本原因在于水土资源未得到良性开发。因此,在来水量有限、人地关系紧张的条件下,定量研究绿洲生态需水量,优化耕作模式,并提供相应的工程、政策及管理措施,使有限的水土资源在绿洲区合理分配利用、最大限度地减少无效耗散与损失,应是当前研究的重点问题。

(5) 阿拉善高原自身的自然环境决定了其有限的水资源禀赋,黑河分水政策的实施是保证额济纳河流域来水量的主要办法。而绿洲区过度地开采及破坏地下水资源,导致地下水位下降、水质持续性恶化,是当前该区域尚未得到相应解决措施且亟待处理的重要生态环境退化问题。

3.2 展望

阿拉善高原所面临的几个主要生态环境退化

问题，它们之间是相互联系、互为耦合的。脆弱的自然环境（干旱的气候背景、有限的水资源）是生态环境发生退化的背景因素，而不合理的人类活动长期作用于脆弱的生态系统，即人地关系间的不相协调，是生态环境退化的主要动因。在中央要求加快推进生态文明建设的今天，相关的工程、政策应加以实施，用以加大对生态系统和自然环境的保护力度。从根本上缓解日趋紧张的人地关系，遏制生态环境退化，恢复和重建脆弱区生态系统，是势在必行的。

参考文献

- 陈晓龙. 2014. 阿拉善高原现代风沙地貌景观形成的光释光年代与机制 [D]. 兰州: 兰州大学. [Chen X L. 2014. Analysis of the landscape in the formation of the present sand desert Alxa Plateau, northern China, based on OSL dating: A case from the Tengger and Jilantai [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 成格尔, 张武文, 徐凯然, 等. 2010. 阿拉善地区沙尘暴与土地沙漠化关系的研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 31(1): 35–40. [Cheng G E, Zhang W W, Xu K R, et al. 2010. Research on the relationship between the sandstorm and land desertification [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 31(1): 35–40.]
- 成格尔. 2007. 影响阿拉善地区沙尘暴特征的气象因素分析 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 28(2): 73–78. [Cheng G E. 2007. The meteorological factors affecting sandstorm in Alashan area [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 28(2): 73–78.]
- 成军锋. 2010. 乌兰布和沙漠及周边地区土地利用与土地覆盖变化研究 [D]. 北京: 北京林业大学. [Cheng J F. 2010. Land use/cover change in Ulanbh Desert and its surrounding region [D]. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 戴新刚, 熊 喆, Kramer K, 等. 2012. 羊啃食动力学模拟与内蒙古西部气候变化适应 [J]. 中国沙漠, 32(5): 1442–1450. [Dai X G, Xiong Z, Kramer K, et al. 2012. Simulation of goat adaptation and sheep grazing dynamics and strategies in west Inner Mongolia climate change, China [J]. *Journal of Desert Research*, 32(5): 1442–1450.]
- 丁 涛, 张武文, 张 宇. 2011. 阿拉善盟土地利用对生态环境的影响分析 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 32(1): 102–106. [Ding T, Zhang W W, Zhang Y. 2011. Analysis on the ecological environment impact of land use in Alashan [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 32(1): 102–106.]
- 董 智, 谷 雨, 李红丽. 2008. 阿拉善地区沙尘暴发生的时空变化规律探讨 [J]. 中国水土保持科学, 6(2): 26–31. [Dong Z, Gu Y, Li L H. 2008. Spatio-temporal variation characteristics of dust-storm in Alaxan region of Inner Mongolia Autonomous region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 6(2): 26–31.]
- 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 2001. 中国生态区划方案 [J]. 生态学报, 21(1): 1–6. [Fu B J, Liu G H, Chen L D, et al. 2001. Scheme of ecological regionalization in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(1): 1–6.]
- 高冠龙, 张小由, 鱼腾飞, 等. 2015. 1987—2008年额济纳绿洲土地覆被变化及其驱动机制 [J]. 中国沙漠, 35(3): 821–829. [Gao G L, Zhang X Y, Yu T F, et al. 2015. Land cover change and its driving factors in the Ejin Oasis during 1987—2008 [J]. *Journal of Desert Research*, 35(3): 821–829.]
- 格日乐, 程 宏, 邹学勇, 等. 2006. 额济纳绿洲土地承载力研究 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 42(6): 624–628. [Ge R L, Cheng H, Zou X Y, et al. 2006. A study on land carrying capacity in Ejina Oasis. [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 42(6): 624–628.]
- 龚家栋. 2005. 阿拉善地区生态环境综合治理意见 [J]. 中国沙漠, 25(1): 98–105. [Gong J D. 2005. Idea for integrated control of eco-environment in Alxa region [J]. *Journal of Desert Research*, 25(1): 98–105.]
- 郭巧玲, 杨云松, 陈志辉. 2010. 黑河分水后额济纳绿洲天然植被覆盖变化遥感监测 [J]. 水资源与水工程学报, 21(5): 65–71+75. [Guo Q L, Yang Y S, Chen Z H. 2010. Remote sensing monitoring vegetation cover change in Ejina Oasis after Heihe River water was distributed [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 21(5): 65–71+75.]
- 郭日生. 2012. 《21世纪议程》: 行动与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 22(5): 5–8. [Guo R S. 2012. Agenda 21: Action and prospect [J]. *China Population, Resources and Environment*, 22(5): 5–8.]
- 何 磊, 马文瑛, 赵传燕. 2015. 人类活动和自然因素在阿拉善盟荒漠化过程中的相对作用 [J]. 兰州大学学报

- (自然科学版), 51(3): 344–350. [He L, Ma W Y, Zhao C Y. 2015. Relative roles of human activities and natural elements in the desertification process in Alxa League [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 51(3): 344–350.]
- 红古乐詠拉. 2016. 阿拉善盟公益林植物多样性及分布格局研究 [D]. 北京: 北京林业大学. [Hong G L Z L. 2016. Studies on plant diversity and distribution pattern of public welfare forest in Alxa League [D]. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 侯仁之, 俞伟超. 乌兰布和沙漠的考古发现和地理环境的变迁 [J]. 考古, 1973, (2): 92–107. [Hou R Z, Yu W C. The archaeological finds and environmental changes in the Wulanbuhe Desert [J]. *Archaeology*, 1973, (2): 92–122.]
- 侯仁之. 1982. 在居延及阳关地区沙漠化过程考察 [J]. 环境研究, 1(3): 2–4 + 13. [Hou R Z. 1982. A investigation on desertification processes in Juyan and Yangguan area [J]. *Environmental Research*, 1(3): 2–4 + 13.]
- 霍擎, 宁小莉, 海全胜. 2011. 包头市达茂旗土地退化及生态重建 [J]. 干旱区资源与环境, 25(3): 65–70. [Huo Q, Ning X L, Hai Q S. 2011. Land degradation and ecological reconstruction in Damao County, Baotou [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(3): 65–70.]
- 姜凌, 李佩成, 胡安焱, 等. 2009. 内蒙古阿拉善腰坝绿洲地下水水化学特征 [J]. 干旱区资源与环境, 23(11): 105–110. [Jiang L, Li P C, Hu A Y, et al. 2009. The groundwater chemical characteristics in the Yaoba Oasis of Alxa area, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23(11): 105–110.]
- 金燕. 2005.《增长的极限》和可持续发展 [J]. 社会科学家, (2): 81–83. [Jin Y. 2005. Limits to growth and sustainable development [J]. *Social Scientist*, (2): 81–83]
- 景爱. 1994. 额济纳河下游环境变迁的考察 [J]. 中国历史地理论丛, (1): 41–62. [Jing A. 1994. The investigation of environmental changes in the lower reaches of the Ejina River [J]. *Collections of Essays on Chinese Historical Geography*, (1): 41–62.]
- 康秀亮. 2008. 运用 GIS 和 RS 技术评价内蒙古额济纳旗沙漠化胁迫下植被敏感性 [D]. 北京: 北京林业大学. [Kang X L. 2008. The sensitivity assessment of vegetation under the condition of land desertification stress in Ejina Banner of Inner Mongolia using GIS and RS technologies [D]. Beijing: Beijing Forestry University.]
- 李森, 李凡, 孙武, 等. 2004. 黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制 [J]. 地理科学, 24(1): 61–67. [Li S, Li F, Sun W, et al. 2004. Modern desertification process in Ejina Oasis and its dynamic mechanism [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(1): 61–67.]
- 李春筱. 2013. 阿拉善高原气候资源与气候变化研究 [D]. 北京: 中国科学院大学. [Li C X. 2013. Study on climatic resources and climatic change in Alxa plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 李克煌, 钟兆站. 1995. 论中国生态环境脆弱带 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 25(4): 57–64. [Li K H, Zhong Z Z. 1995. On ecotone in China [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 25(4): 57–64..]
- 李亚飞, 康慕谊, 朱源, 等. 2008. 内蒙古阿拉善地区沙尘天气与部分气候因素关系研究 [J]. 资源科学, 30(7): 1115–1121. [Li Y F, Xi M Y, Zhu Y, et al. 2008. Relationship between climatic factors and sand-dust weather events in the Alxa region of Inner Mongolia [J]. *Resources Science*, 30(7): 1115–1121.]
- 梁圆, 千怀遂, 张灵. 2016. 中国近 50 年降水量变化区划 (1961—2010 年) [J]. 气象学报, 74(1): 31–45. [Liang Y, Qian H S, Zhang L. 2016. Regionalization of the annual precipitation change in the last 50 years in China (1961—2010) [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(1): 31–45.]
- 廖杰, 王涛, 薛娴. 2015. 黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量 [J]. 中国沙漠, 35(1): 228–232. [Liao J, Wang T, Xue X. 2015. Lake's evaporation in the Ejin Basin since transferring water from the Heihe River [J]. *Journal of Desert Research*, 35(1): 228–232.]
- 刘国华, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 2000. 中国生态退化的主要类型, 特征及分布 [J]. 生态学报, 20(1): 13–19. [Liu G H, Fu B J, Chen L D, et al. 2000. Characteristics and distributions of degraded ecological types in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 20(1): 13–19.]
- 马燕, 李志萍, 曹希强. 2010. 近 200 年来额济纳绿洲土地荒漠化进程及其驱动机制 [J]. 水土保持研究, 17(5): 158–162. [Ma Y, Li Z P, Cao X Q. 2010. Study of land desertification and its driving mechanism in Ejina Oasis during recent 200 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 17(5): 158–162.]
- 马玉寿, 周华坤, 邵新庆, 等. 2016. 三江源区退化高寒

- 生态系统恢复技术与示范 [J]. 生态学报, 36(22): 7078–7082. [Ma Y S, Zhou H K, Shao X Q, et al. 2016. Recovery techniques and demonstration of degraded alpine ecosystems in the source region of three rivers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(22): 7078–7082.]
- 苗 鸿, 王效科, 欧阳志云. 2001. 中国生态环境胁迫过程区划研究 [J]. 生态学报, 21(1): 7–13. [Miao H, Wang X K, Ouyang Z Y. 2001. Study on regionalization of eco-environmental stress process in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(1): 7–13.]
- 牛文元. 1989. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定 [J]. 生态学报, 9(2): 97–105. [Niu W Y. 1989. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 9(2): 97–105.]
- 欧阳志云, 王效科, 苗 鸿. 2000. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究 [J]. 生态学报, 20(1): 9–12. [Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. 2000. Study on regionalization of eco-environmental stress process in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 20(1): 9–12.]
- 彭翠华. 2007. 阿拉善盟腰坝绿洲地下水水质演化及其预测研究 [D]. 西安: 长安大学. [Peng C H. 2007. Groundwater quality evolution and prediction of Yaoba Oasis in Alashan [D]. Xi'an: Chang'an University.]
- 师 伟. 2007. 阿拉善腰坝绿洲地下水资源开发利用及其合理配置研究 [D]. 西安: 长安大学. [Shi W. 2007. Study on the exploitation and utilization and optimal allocation of water resources in Yaoba Oasis [D]. Xi'an: Chang'an University.]
- 史培军, 孙 劲, 汪 明, 等. 2014. 中国气候变化区划(1961—2010年) [J]. 中国科学: 地球科学, 44(10): 2294–2306. [Shi P J, Sun S, Wang M, et al. 2014. Climate change regionalization in China (1961—2010). *Science China: Earth Sciences*, 44(10): 2294–2306.]
- 孙鸿烈, 陈宜瑜, 于贵瑞, 等. 2014. 国际重大研究计划与中国生态系统研究展望——中国生态大讲堂百期学术演讲暨2014年春季研讨会评 [J]. 地理科学进展, 33(7): 865–873. [Sun H L, Chen Y Y, Yu G R, et al. 2014. Major international programs and prospects of ecosystem research in China: a review of the 100th lecture series/spring 2014 symposium of China Ecological Forum [J]. *Progress in Geography*, 33(7): 865–873.]
- 万国鼎. 1965. 陈旼农书校注 [M]. 北京: 农业出版社. [Wan G D. 1965. Farm book collated by Chen Fu [M]. Beijing: Agricultural Press.]
- 万 炳, 张爱国. 2014. 基于生态环境敏感性的山西吉县生态移民区划研究 [J]. 云南地理环境研究, 26(1): 40–47. [Wan W, Zhang A G. 2014. Study on ecological immigration division of Shanxi Jixian based on the ecological environment sensitivity [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 26(1): 40–47.]
- 王 涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 2001. 中国北方沙尘暴现状及对策 [J]. 中国沙漠, 21(4): 322–327. [Wang T, Chen G T, Qian Z A, et al. 2001. Situation of sand-dust storms and countermeasures in North China [J]. *Journal of Desert Research*, 21(4): 322–327.]
- 王 涛, 颜长珍, 宋 翔. 2008. 近30 a 内蒙古阿拉善盟不同生态系统土地利用动态遥感监测 [J]. 中国沙漠, 28(6): 1001–1004. [Wang T, Yan C Z, Song X. 2008. Remote sensing monitoring on land use changes of each ecosystem in Alax Prefecture of Inner Mongolia in last 30 years [J]. *Journal of Desert Research*, 28(6): 1001–1004.]
- 王 涛, 赵哈林. 2005. 中国沙漠科学的五十年 [J]. 中国沙漠, 25(2): 145–165. [Wang T, Zhao H L. 2005. Fifty-year history of China desert science [J]. *Journal of Desert Research*, 25(2): 145–165.]
- 王华伟, 高 鹏, 吕圣桥, 等. 2011. 辽宁西部北票市生态修复区生态退化驱动力分析 [J]. 水土保持研究, 18(1): 121–124. [Wang H W, Gao Peng, Lü S Q, et al. 2011. Driving factors analysis of restoration area of ecological degradation in ecological western Liaoning Province—A case study of Beipiao City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 18(1): 121–124.]
- 王旭东, 刘克利, 戴玉芝, 等. 2009. 1957—2007年额济纳荒漠绿洲暖干化趋势 [J]. 干旱区研究, 26(6): 771–778. [Wang X D, Liu K L, Dai Y Z, et al. 2009. Warming-drying trend in the desert and oasis in Erjina Banner during the period of 1957—2007 [J]. *Arid Zone Research*, 26(6): 771–778.]
- 席海洋, 冯 起, 司建华, 等. 2011a. 额济纳绿洲不同植被覆盖下土壤特性的时空变化 [J]. 中国沙漠, 31(1): 68–75. [Xi H Y, Feng Q, Si J H, et al. 2011a. Spatio-temporal characteristics of soil in Ejina Oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 31(1): 68–75.]
- 席海洋, 冯 起, 司建华, 等. 2011b. 额济纳盆地地下水时空变化特征 [J]. 干旱区研究, 28(4): 592–601. [Xi H Y, Feng Q, Si J H, et al. 2011b. Study on spatiotemporal

- change of groundwater in the Ejin Basin [J]. *Arid Zone Research*, 28(4): 592–601.]
- 谢家丽, 颜长珍, 李 森, 等. 2012. 近 35 a 内蒙古阿拉善盟绿洲化过程遥感分析 [J]. *中国沙漠*, 32(4): 1142–1147. [Xie J L, Yan C Z, Li S, et al. 2012. Remote sensing monitoring of oasis spatial-temporal changes in Alxa during recent 35 years [J]. *Journal of Desert Research*, 32(4): 1142–1147.]
- 徐艳红, 于鲁冀, 吕晓燕, 等. 2017. 淮河流域河南段退化河流生态系统修复模式 [J]. *环境工程学报*, 11(1): 143–150. [Xu Y H, Yu L J, Lü X Y, et al. 2017. Ecological restoration modes for Huaihe River basin of Henan, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 11(1): 143–150.]
- 姚正毅, 王 涛, 杨经培, 等. 2008. 阿拉善高原频发沙尘暴因素分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 22(9): 54–61. [Yao Z Y, Wang T, Yang P J, et al. 2008. Analysis on frequently occurrence of dust storm in the Alxa plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 22(9): 54–61.]
- 尤 莉, 王革丽, 吴学宏, 等. 2004. 内蒙古阿拉善地区沙尘暴的气候特征分析 [J]. *高原气象*, 23(3): 382–386. [You L, Wang G L, Wu X H, et al. 2004. Analyses on duststorm climatic characteristics in Alashan, Inner Mongolia [J]. *Plateau Meteorology*, 23(3): 382–386.]
- 余谋昌. 1991. 生态意识及其主要特点 [J]. *生态学杂志*, 10(4): 68–71. [Yu M C. 1991. Ecological consciousness and its main characteristics [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 10(4): 68–71.]
- 鱼腾飞, 冯 起, 司建华, 等. 2011a. 黑河下游额济纳绿洲植物群落特征与物种多样性研究 [J]. *西北植物学报*, 31(5): 1032–1038. [Yu T F, Feng Q, Si J H, et al. 2011a. Community characteristics and species diversity of Ejina Oasis in the lower reaches of the Heihe River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 31(5): 1032–1038.]
- 鱼腾飞, 冯 起, 司建华, 等. 2011b. 黑河下游额济纳绿洲植物群落物种多样性的空间异质性 [J]. *应用生态学报*, 22(8): 1961–1966. [Yu T F, Feng Q, Si J H, et al. 2011b. Spatial heterogeneity of plant community species diversity in Ejina Oasis at the lower reaches of Heihe River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(8): 1961–1966.]
- 袁晓波, 尚振艳, 牛得草, 等. 2015. 黄土高原生态退化与恢复 [J]. *草业科学*, 32(3): 363–371. [Yuan X B, Shang Z Y, Niu D C, et al. 2015. Advances in ecological degeneration and restoration of Loess Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 32(3): 363–371.]
- 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 2004. 阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴 [J]. *第四纪研究*, 24(3): 311–317. [Yue L P, Yang L R, Li P Z, et al. 2004. Lacustrine deposit in the Alxa plateau and the sand-dust storm in northern China [J]. *Quaternary Sciences*, 24(3): 311–317.]
- 章家恩, 徐 琪. 1997. 生态退化研究的基本内容与框架 [J]. *水土保持通报*, 17(6): 46–53. [Zhang J N, Xu Q. 1997. Basic content and structure of ecological degradation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 17(6): 46–53.]
- 赵 雪, 张小由, 李启森, 等. 2004. 额济纳绿洲沙漠化对柽柳群落影响的研究 [J]. *中国沙漠*, 24(4): 467–472. [Zhao X, Zhang X Y, Li Q S, et al. 2004. Influence of sandy desertification on in Ejin Oasis community [J]. *Journal of Desert Research*, 24(4): 467–472.]
- 赵文智, 杨 荣, 刘 冰, 等. 2016. 中国绿洲化及其研究进展 [J]. *中国沙漠*, 36(1): 1–5. [Zhao W Z, Yang R, Liu B, et al. 2016. Oasification of Northwestern China, a review [J]. *Journal of Desert Research*, 36(1): 1–5.]
- 郑 度. 1999. 中国土地退化整治及其地域分异研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. [Zheng D. 1999. Management and Regional Differentiation of Land Degeneration in China [M]. China Environmental Science Press.]
- 郑 度. 2008. 中国生态地理区域系统研究 [M]. 北京: 商务印书馆. [Zheng D. 2008. Chinese ecological geographic area system research [M]. Beijing: The Commercial Press.]
- 郑昭佩. 2011. 恢复生态学概论 [M]. 北京: 科学出版社. [Zheng Z P. 2011. Restoration ecology [M]. Beijing: Science Press.]
- 钟华平, 刘 恒, 王 义, 等. 2002. 黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系 [J]. *水科学进展*, 13(2): 223–228. [Zhong H P, Liu H, Wang Y, et al. 2002. Relationship between Ejina Oasis and water resources in the lower Heihe River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 13(2): 223–228.]
- 周云轩, 田 波, 黄 穗, 等. 2016. 我国海岸带湿地生态系统退化成因及其对策 [J]. *中国科学院院刊*, 31(10): 1157–1166. [Zhou Y X, Tian B, Huang Y, et al. 2016. Degradation of coastal wetland ecosystem in China: drivers, impacts, and strategies [J]. *Bulletin of Chinese*

- Academy of Sciences, 31(10): 1157–1166.]
- 朱金峰. 2011. 巴丹吉林沙漠边缘地区近20年土地沙漠化遥感监测研究 [D]. 兰州: 兰州大学. [Zhu J F. 2011. Monitoring of desertification on the edge of Badain Jaran Desert in recent 20 years based on remote sensing imagery [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- Baranovitch N. 2016. Ecological degradation and endangered ethnicities: China's minority environmental discourses as manifested in popular songs [J]. *The Journal of Asian Studies*, 75(1): 181–205.
- Bridgewater P, Phillips A. 1996. Biosphere reserves and the IUCN system of protected area management categories [Z]. A joint publication of the Australia Nature Conservation Agency, the World Conservation Union and the UNESCO Man and the Biosphere Programme.
- Dow K. 1992. Exploring differences in our common future(s): the meaning of vulnerability to global environmental change [J]. *Geoforum*, 23(3): 417–436.
- Graf W, Leitner P, Hanetseder I, et al. 2016. Ecological degradation of a meandering river by local channelization effects: a case study in an Austrian lowland river [J]. *Hydrobiologia*, 772(1): 145–160.
- Lahsen M. 2016. Toward a sustainable future earth: challenges for a research agenda [J]. *Science, Technology & Human Values*, 41(5): 876–898.
- Meyer W B, Turner II B L. 1994. Changes in land use and land cover: a global perspective [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pei S, Fu H, Wan C. 2008. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124(1): 33–39.
- Tucker R P. 2000. Insatiable appetite: The United States and the ecological degradation of the tropical world [M]. Berkeley: University of California Press.
- Wang H, Zhou X, Wan C, et al. 2008. Eco-environmental degradation in the northeastern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau and comprehensive ecological protection planning [J]. *Environmental Geology*, 55(5): 1135–1147.
- Wang Q. 2009. Prevention of Tibetan eco-environmental degradation caused by traditional use of biomass [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9): 2562–2570.
- Wang T, Yan C Z, Song X, et al. 2013. Landsat images reveal trends in the aeolian desertification in a source area for sand and dust storms in China's Alashan plateau (1975—2007) [J]. *Land Degradation & Development*, 24(5): 422–429.