

DOI: 10.5846/stxb201504130745

江凌,肖燚,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): - .

Jiang L, Xiao Y, Rao E M, Wang L Y, Ouyang Z Y. Effects of Land Use and Cover Change (LUCC) on Ecosystem Sand Fixing Service in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

内蒙古土地利用变化对生态系统防风固沙功能的影响

江凌^{1,2}, 肖燚^{1,*}, 饶恩明^{1,2}, 王莉雁^{1,2}, 欧阳志云¹

1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 土壤风蚀是内蒙古的严重环境问题之一。在对内蒙古 2000 年到 2010 年的土地利用变化特征进行分析的基础上, 分析了内蒙古土地利用变化的主要特征, 以 RWEQ 模型估算了内蒙古 2000 年和 2010 年的固沙物质量, 采用空间统计分析评估了固沙功能对土地利用变化的响应, 结果表明: (1) 2000 年至 2010 年土地利用变化以城镇高速发展、草地和湿地面积锐减、林地灌丛有所恢复以及荒漠环境改善为主要特征。 (2) 2000—2010 的 10 a 间内蒙古固沙物质量总量增长了 17.75%, 草地总面积虽有所降低, 但是部分区域草地覆盖度的上升增强了草地固沙能力, 而林地的固沙物质量则由于农田、草地改为林地的短期内地表保护力的下降而有所降低。 (3) 10 a 间农田退耕还草、荒漠环境的改善、草地质量提高等土地利用变化方式有益于生态环境质量的提高, 使生态防风固沙功能得以增强, 造成固沙物质量提高了约 0.25 亿吨。 (4) 农田开垦、城镇发展、荒漠化发展、湿地萎缩以及草地的退化等土地利用变化会使生态环境质量降低, 生态系统防风固沙功能下降, 累计造成的固沙物质量的减少总量约为 0.19 亿吨。从 10 a 间综合来看, 内蒙古的土地利用变化对区域固沙功能有一定的增强作用, 但是尚存在城镇发展过快、草地湿地转化压力过大、草地退化、荒漠化对固沙功能的弱化问题, 需要在今后的土地利用规划和管理工作中予以改进以进一步增强区域固沙功能, 构建北方地区生态安全屏障。

关键词: LUCC(土地利用变化); RWEQ(修正风蚀方程); 防风固沙功能

Effects of Land Use and Cover Change (LUCC) on Ecosystem Sand Fixing Service in Inner Mongolia

JIANG Ling^{1,2}, XIAO Yi^{1,*}, RAO Enming^{1,2}, WANG Liyan^{1,2}, OUYANG Zhiyun¹

1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Wind erosion is one of the most serious environmental problems in Inner Mongolia. Based on the analysis of land use change characteristics from 2000 to 2010 in Inner Mongolia, we quantify ecosystem sand fixation service in 2000 and 2010, and its changes by using revised wind erosion equation (RWEQ). Between 2000 and 2010 the areas of forest/shrub and urban increased with the decrease of grassland and wetland area. The ecosystem sand fixation service increased by 17.75% during 2000—2010. The grassland coverage increased and the ability of grassland fixing sand increased by about 25 million tons per year correspondingly. However, the sand fixation ability of forest decreased due to the conversion from farmland and grassland to forest, which resulted in surface destruction in the short term. Other land use changes, including farmland reclamation, urban expansion, desertification, wetland and grassland degradation, also decreased ecosystem sand fixation service by about 19 million tons per year. Our results suggest ecosystem sand fixation service increased during

基金项目:

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-12-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail:

2000—2010 in Inner Mongolia due to the forest/shrub area and grassland coverage increase. However, it shouldn't be neglected the impacts of fast urbanization, grassland and wetland loss on ecosystem services. Effective measures should be taken to tradeoff the urbanization, agricultural development and ecosystem service conservation.

Key Words: land use and cover change; revised wind erosion equation; ecosystem sand fixation service; Inner Mongolia

土壤风蚀是干旱半干旱地区广泛存在的严重环境问题之一^[1]。防风固沙功能是风蚀地区自然生态系统重要的生态服务功能之一,生态系统植被对风沙的抑制和固定作用^[2-5],为区域生产生活可持续发展创造条件。土地利用是人类根据土地自然特点采取生物、技术等手段对土地进行长期的经营管理以达到一定的经济和社会目的的活动。土地利用方式的改变被认为是全球变化的决定因素之一,会对生态系统的格局和质量产生影响,从而引发生态系统服务功能的相应改变^[6-8]。近年来,在土地利用变化背景下的生态系统服务功能的量化评价成为研究热点^[9-12],对生态系统防风固沙功能的关注度也逐渐提高^[13-14],而土地利用变化对防风固沙功的影响方面的研究还相对涉及较少。

内蒙古地处中国北部,属于典型的干旱半干旱气候区,我国三分之一面积的沙漠和沙地分布于此^[15],充沛的沙源和频发的大风天气使该区域饱受土壤风蚀的侵扰,而经济发展所带来的高强度人类活动和剧烈的土地类型转变更是加剧了风蚀过程。土壤风蚀导致的土地退化、沙漠化降低了土壤的生产力,削弱生态系统服务功能的同时^[16-19],扬沙、沙尘以至沙尘暴天气对大气环境质量的影响^[20-21]更是对整个中国的华北、东北地区乃至周边国家和地区的人民生活质量以及身心健康造成了严重的困扰^[22-25]。在土地利用变化的基础上研究其和防风固沙这一生态系统服务功能的关系对区域生态系统固沙功能的恢复和改善具有重要意义。

本研究在对 2000—2010 年内蒙古土地利用格局的改变进行分析的基础上,对内蒙古生态系统防风固沙功能产生的相应变化进行了定量的分析和评价,以期为进一步恢复内蒙古生态系统质量,提高生态系统服务功能的供给能力,为构建京津冀地区的生态安全屏障提供参考和借鉴。

1 研究区概况

内蒙古自治区地处我国北部,位于 37°24'—53°23'N, 97°12'—126°04' E 之间,地处内蒙古高原,地域辽阔东西狭长,总面积约 118 万 km²。气候以温带大陆性季风气候为主,从东到西跨越了温带湿润区、半湿润区、半干旱区、干旱区和极端干旱区等 5 个气候区,从而形成了多样的地理环境和丰富的自然资源,地势东西跨越东北、华北、西北地区。年降水量 50—450 mm,由东北向西南递减;年均气温为 0—8 ℃^[26-27]。广袤的沙漠分布、频发的大风天气以及干旱少雨的气象条件使该区域成为我国风力侵蚀非常严重的地区之一。内蒙古生态系统基本格局是:“东林中草西沙,北牧南农”,草地是内蒙古主要的生态系统类型(图 1)。

内蒙古是我国典型的农牧交错带,土地利用政策在多年的社会发展过程中不断调整 and 变化,从大面积开垦草地和林地以满足经济发展的“以粮为纲”到现阶段的退耕还林还草的“生态为先”,土地利用强度和方式都发生了极大的改变,土地利用格局变化显著,对生态系统格局与过程产生了不同性质的影响。高速发展的社会经济需求和快速增长的人口压力使得内蒙古土地利用变化激烈:在 20 世纪 80—90 年代间,由于人口增长、过度放牧、草原大范围垦殖,造成了大面积的草地退化和荒漠化,失去了地表植被的保护,土壤发生严重风蚀,风蚀迅速扩展,严重影响了内蒙古的正常生产和生活秩序^[28-32]。90 年代末期以来,内蒙古实行了

退耕还林还草、天然林保护、京津风沙源治理、生态移民、封育轮牧等一系列生态工程和管理措施,力图缓解生态压力,逐步恢复生态质量^[33-34]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究采用的主要数据均来自“全国生态环境十年变化遥感调查评估”项目数据库,其中土壤属性数据

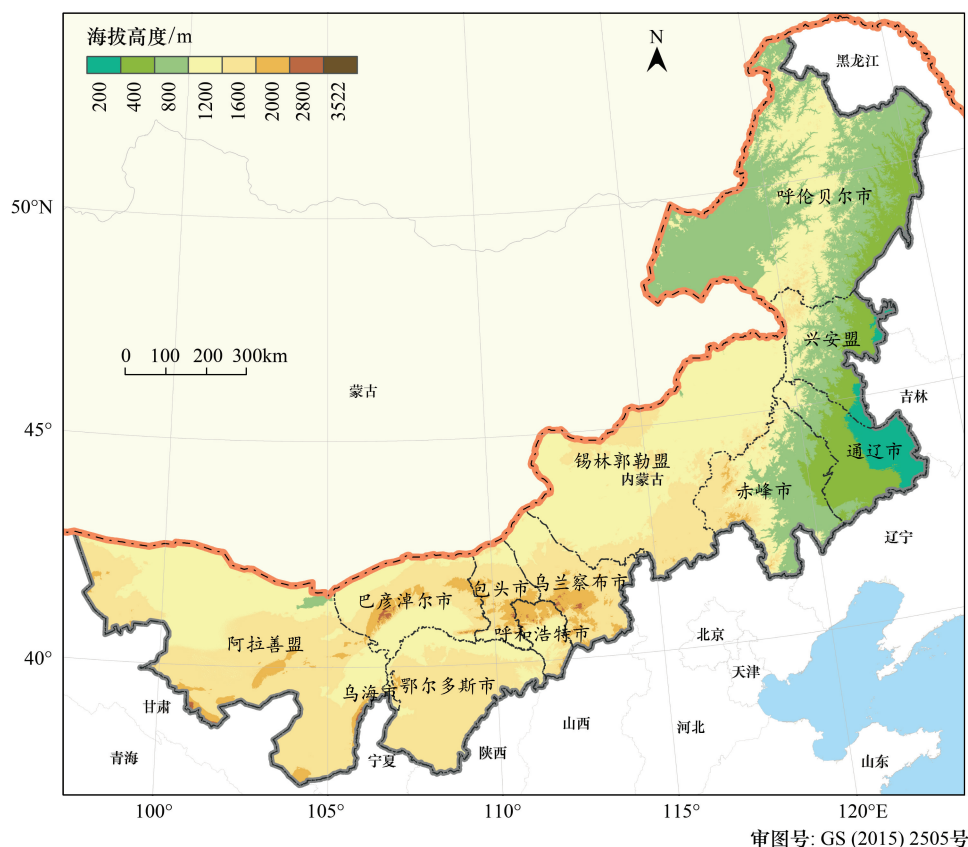


图1 研究区位置及海拔高程

Fig.1 The location and altitude distribution of study area

集(包括土种类型、土壤粗砂、细砂、粘粒、土壤容重、N、P、K 及有机质含量等理化性质)^[35]、多年平均太阳辐射数据、多年平均积雪覆盖深度等 1 km×1 km 栅格数据由寒区旱区科学数据中心下载;1980—2010 年的多年平均降雨、气温、风速等月均数据由中国地理科学研究所通过对气象站点数据空间插值得到气象栅格数据;2000 年和 2010 年 250 m 植被覆盖度数据和 30 m 土地利用类型分类图由中国科学院遥感所制作提供,其中土地利用类型结合气候、地形等生物地理参量和生态系统特征,将内蒙古生态系统分为 8 个一级生态系统和 29 个二级生态系统^[36],在此基础上,参考水土流失强度和土地沙漠化强度划分阈值,将天然草地根据植被覆盖度整理为高、中、低植被覆盖度草地生态系统;90 m 数字高程 DEM 来由中国科学院计算机网络信息中心提供。所有空间数据在采用前均统一投影方式为 Albers 等积圆锥投影,大地基准面为 D_WGS_1984,双标准纬线为 25°N 和 47°N,中央经线为 105°E,数据精度均重采样为 90 m 空间精度。

2.2 土地利用变化分析

为表征内蒙古在 10 a 间的土地利用变化量、变化方向和变化空间形式,本研究以动态度指数表征各个地类的变化幅度和速度,用转移矩阵分析了地类间的相互转移,以此来揭示研究区土地利用变化的规律及特点。

2.2.1 土地利用变化动态度

土地利用变化动态度反映了研究区某一时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况,可以直观反映土地利用类型的变化幅度和速度,揭示土地利用变化的基本特征。其表达式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中, U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期某地类的面积, T 为研究时段,本次研究取 1, 计算 10 a 总动态度。

2.2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是对土地利用类型间相互转化的数量和方向定量研究的主要方法,它能够具体的反映土地利用变化的结构特征和各类型间的转移方向。在 ARCGIS 工具软件中利用叠加分析功能对两期土地利用变化数据进行统计分析即可得到内蒙古两个年份间的土地利用转移关系矩阵。

2.3 防风固沙功能物质质量估算方法

内蒙古防风固沙功能以自然植被的沙物质固定量作为评价指标,固沙物质质量的计算思路是以假设没有植被的条件下产生的风蚀总量减去在实际植被保护条件下的风蚀总量,二者差值即代表区域生态系统植被对风沙的固定量。本研究选取 RWEQ 模型作为风蚀量的计算工具估算鄂尔多斯生态系统潜在风蚀 $S_{L\text{潜}}$ 和实际风蚀量 S_L ,以两者之差 G 表征内蒙古生态系统防风固沙功能的变化量。在 ARCGIS 的叠加分析功能下,对两年的土地利用发生转移的栅格的固沙量变化进行统计作为土地利用变化对固沙功能影响的表征。固沙物质质量的基本计算公式如下:

$$Q_{\max\text{潜}} = 109.8 [WF \times EF \times SCF \times K'] \quad (2)$$

$$S_{\text{潜}} = 150.71 \cdot (WF \times EF \times SCF \times K') - 0.3711 \quad (3)$$

$$S_{L\text{潜}} = \frac{2 \cdot z}{S_{\text{潜}}^2} Q_{\max\text{潜}} \cdot e^{-(z/s_{\text{潜}})^2} \quad (4)$$

$$Q_{\max} = 109.8 [WF \times EF \times SCF \times K' \times C] \quad (5)$$

$$S = 150.71 \cdot (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) - 0.3711 \quad (6)$$

$$S_L = \frac{2 \cdot z}{S^2} Q_{\max} \cdot e^{-(z/s)^2} \quad (7)$$

$$G = S_{\text{潜}} - S_L \quad (8)$$

式中, G 为固沙量; S_L 为土壤风蚀量; $Q_{\max}$ 为风沙最大转运容量; S 为关键地块长度; $S_{\text{潜}}$ 、 $Q_{\max\text{潜}}$ 、 $S_{L\text{潜}}$ 分别代表潜在风蚀、潜在转运量、潜在地块长度; z 为下风向最大风蚀出现距离; WF 为气象因子; EF 为土壤可蚀性因子; SCF 为土壤结皮因子; K' 为地表糙度因子; C 为植被覆盖因子。各因子计算方法如下所述。

2.3.1 气象因子(WF)

气象因子 WF 即风速、温度及降雨等各类气象因子对风蚀综合影响的反映^[37],其表达式如下。

$$WF = Wf \times \frac{\rho}{g} \times SW \times SD \quad (9)$$

$$Wf = u_2 (u_2 - u_1)^2 \times N_d \quad (10)$$

式中, WF 为气象因子(kg/m); Wf 为风力因子(m/s)³; g 为重力加速度(m/s^2); ρ 为空气密度(kg/m^3); SW 为土壤湿度因子; SD 为雪盖因子; u_1 为起沙风速,本次计算取 5m/s ; u_2 为气象站月均风速值(m/s); N_d 为各月风速大于 5m/s 的天数。

2.3.2 土壤可蚀性因子(EF)

土壤可蚀因子 EF 是一定土壤理化条件下土壤受风蚀影响大小^[38],其表达式如下。

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.59OM - 0.95 caca_3}{100} \quad (11)$$

式中, sa 为土壤粗砂含量(%), si 为土壤粉砂含量(%), cl 为土壤粘粒含量(%), OM 为土壤有机质含量(%), $caco_3$ 为碳酸钙含量(%),本次计算取 0。

2.3.3 土壤结皮因子(SCF)

土壤表层的坚硬结皮能有效防止风蚀的发生。土壤结皮因子 SCF 即在一定土壤理化条件下土壤结皮抵抗风蚀能力的大小^[39],其表达式如下。

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066 (cl)^2 + 0.021 (OM)^2} \quad (12)$$

式中, cl 为土壤粘粒含量(%); OM 为土壤有机质含量(%).

2.3.4 植被因子(C)

植被覆盖因子 C 表示一定植被条件对风蚀的抑制程度^[40],其表达式如下。

$$C = e^{-0.0483(SC)} \quad (13)$$

式中, sc 为植被覆盖度(%).

2.3.5 地表糙度因子(K')

地表糙度 K' 是由地形所引起地表粗糙程度对风蚀影响的反映^[41],其表达式如下。

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.127C_{rr})} \quad (14)$$

$$K_r = 0.2 \cdot \frac{(\Delta H)^2}{L} \quad (15)$$

式中, C_{rr} 为随机糙度因子(cm),本次计算暂未考虑; K_r 为地形糙度因子(cm); L 为地势起伏参数; ΔH 为距离 L 范围内的海拔高程差。

3 结果与分析

3.1 内蒙古土地利用变化特点

3.1.1 土地利用构成及变化

受地形气候影响,内蒙古地区从西向东呈现“荒漠-草原-森林”逐渐变化的空间格局(图 2),草地是内蒙古的主要土地利用类型,也是内蒙古植被生态系统的主体。2010 年内蒙古草地分布面积 53.8 万 km^2 ,占研究区总面积的 47.89%。在 2000 年至 2010 年的 10 a 间,内蒙古土地利用类型随经济社会发展不断变动,其中其中草地、裸地和湿地面积呈减少趋势,而林地、灌丛、农田、城镇均表现出不同程度的面积扩展(表 1)。10 a 间,内蒙古草地面积减少了 3111.4 km^2 ,湿地面积减少了 921.29 km^2 ,裸地面积减少了 305.5 km^2 ,变化幅度分别为-0.57%、-1.89%和-0.25%,是其他各类土地利用类型得以扩展的来源(图 2)。在面积增加的土地利用类型中,以城镇的动态度变化最大,10 a 间其面积增长了 2482.64 km^2 ,动态度为 22.4%,城市发展十分迅速;林地和灌丛的面积也出现了不同程度的增加,分别增加了 928.43 km^2 和 608.87 km^2 ,动态度分别为 0.56%和 2.35%,生态系统在局部区域得到了恢复和提高。

3.1.2 土地利用类型转移特征

根据内蒙古一级土地利用类型转移矩阵(表 2),10 a 间内蒙古的土地利用类型的转换主要是从草地、湿地和部分裸地向林地、灌丛、农田和城镇的转移,根据其转移特点和方向,将 2000—2010 年内蒙古土地利用类型的转移特征总结为以下几点:

(1)城镇扩展迅速:10 a 间,内蒙古城市面积净增长了 22.4%,草地和农田是城镇面积扩展的主要来源。图 3 反应了各类型土地转成城镇用地后的转换特征:转为城镇的草地面积中的 39.5%是转换为采矿场,22.99%直接转变为居住用地,其余的 36.85%分别转换为工业和交通用地;而转为城市的农田的 59.1%面积直接转变为城市建成区,另有 39.8%的农田面积分别转换为工业、交通和采矿用地。从分布空间上看,内蒙古城市发展速度要以呼和浩特市、包头、乌海和鄂尔多斯市为代表的中部区域高于东部和西部区域。相对于城市的大面积转入,城市的转出显得微不足道,这也是城市用地的显著特点之一。在 10 a 间,仅有约 25.1 km^2 的土地由城市转变为其他用地类型,其中由工业和采矿用地转为草地约 10 km^2 ,转为农田约 5.5 km^2 。

(2)农业用地变化剧烈:从农业用地面积总变化来看,10 a 间内蒙古农用地面积仅增加了 299.33 km^2 ,变化不大,变化幅度仅为 0.245(图 3.b)。但从土地利用转移矩阵可见,10 a 间农业用地转出计 1097.1369 km^2 ,同时转入面积约 1396.46 km^2 ,波动面积达到 2493.6 km^2 ,变动强度较大。10 a 间,除了转为城市建设用地和退耕还林地还草的转出外,分别有 673.6 和 542.7 km^2 的草地和湿地重新转入为农田,是退耕农田数量的 1.90 倍。从空间上看,新开垦的农田大多分布在雨水相对充沛的内蒙古东部区域,如呼伦贝尔市、兴安盟、通辽

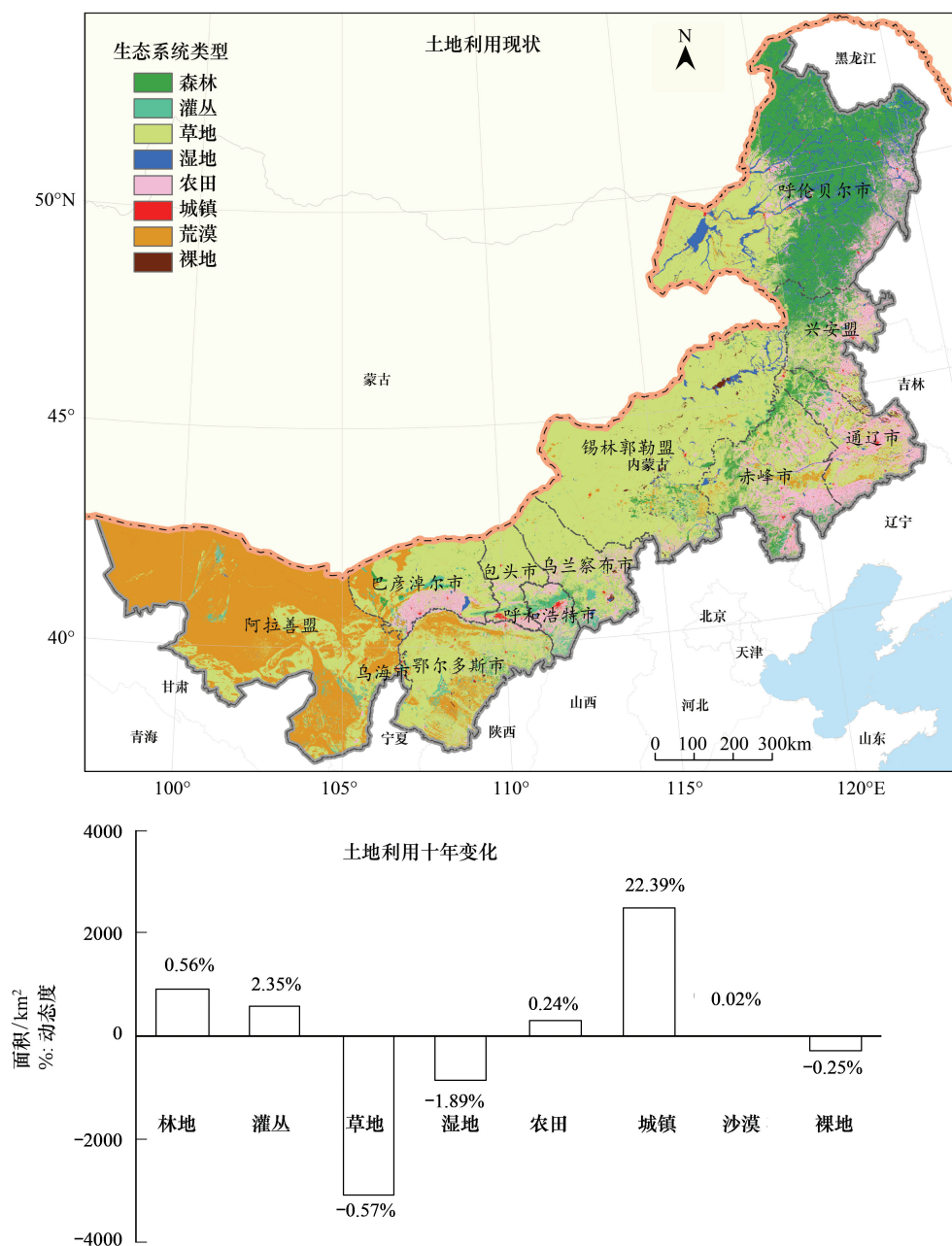


图 2 内蒙古 2010 年土地利用现状及 10 年变化

Fig.2 Mapping of 2010 land use and dynamic change of ten years in the Inner Mongolia

市和赤峰市区域,而农田的退耕主要在在内蒙古中部农牧交错带,如包头市、呼和浩特市、乌兰察布市等区域,东部区域虽然也有部分的农田实现了退耕,但是其农田新开垦的力度远大于退耕力度。

(3)林地、灌丛有所恢复,草地转换强度较大:林灌草是自然生态系统的主要类型,在 10 a 间,内蒙古的自然植被系统变化特征表现为林地、灌丛面积的小幅度恢复,而草地则表现为大面积净转出特征(图 3.c)。林地、灌丛的面积增长主要来自于 789.9 km²草地、147.4 km²农田和以及小面积湿地、裸地和沙漠等土地利用类型。10 a 间总计有 1064.7 km²的湿地、农田和沙漠裸地转为草地,但草地在十年间转出面积达 4168.3 km²,其中有 34.2%的转出草地是向林地、灌丛和湿地等生态系统转移,另有 58.4%的草地主要转为城镇和农田等人工生态系统,另有 7.4%的草地生态系统退化为沙地和裸地。从空间上看,林灌草等土地类型有所增加的区域相对集中分布在内蒙古西部阿拉善盟、中部包头市、鄂尔多斯市的达拉特旗,东部的通辽市、赤峰市以及北部的

呼伦贝尔市。而内蒙古各大城市周边的草地、湿地在城市发展下转为城镇或农田的压力较大。

表 1 2000—2010 内蒙古土地利用类型生态质量指数

Table 1 The Inner Mongolia eco-environmental value for the land use type during 2000 and 2010

一级分类 Classification I		二级分类 Classification II		生态用地类型面积(×10 ⁴ km ²) The area of classification	
编号 Number	名称 Name	编号 Number	名称 Name	2000	2010
1	森林	111	林地	16.17	16.26
		121	稀疏林地	0.51	0.51
2	灌丛	211	灌丛	2.06	2.11
		221	稀疏灌丛	0.54	0.54
3	草地	311	高覆盖度草地	0.35	0.15
		321	中覆盖度草地	21.10	22.78
		331	低覆盖度草地	32.67	30.88
4	湿地	411	森林沼泽	0.01	0.01
		412	灌丛沼泽	0.14	0.14
		413	草本沼泽	3.89	3.86
		421	湖泊	0.51	0.43
		422	水库/坑塘	0.04	0.06
		431	河流	0.28	0.27
		432	运河/沟渠	0.01	0.01
		511	水田	0.15	0.15
5	农田	512	旱地	12.26	12.29
		521	乔木园地	0.00	0.00
		522	灌木园地	0.00	0.00
6	城镇	611	居住地	0.79	0.86
		621	乔木绿地	0.01	0.01
		622	灌木绿地	0.00	0.00
		623	草本绿地	0.00	0.00
		631	工业用地	0.06	0.10
		632	交通用地	0.20	0.25
		633	采矿场	0.05	0.13
7	沙漠	711	沙漠/沙地	10.42	10.42
8	裸地	912	裸岩	3.90	3.89
		913	湖土	7.87	7.84
		914	盐碱地	0.58	0.58

表 2 内蒙古 2000—2010 年土地利用类型转移矩阵

Table 2 Transferring matrix of land use type in Inner Mongolia during 2000—2010

	林地 Forest land	灌丛 Shrub land	草地 Grassland	湿地 Wetland	农田 Cultivated land	城镇 Build-up land	沙漠 Desert land	裸地 Unused land
林地 Forest land	166620.44	3.26	13.36	12.94	18.39	39.16	1.00	0.49
灌丛 Shrub land	1.97	25901.95	7.01	0.49	1.62	23.45	0.10	0.68
草地 Grassland	788.87	400.67	536936.32	237.58	679.12	1753.18	165.27	143.62
湿地 Wetland	44.37	8.44	564.88	47062.43	566.33	89.61	220.77	122.20
农田 Cultivated land	147.39	162.32	112.05	235.30	122993.65	432.51	2.88	4.71
城镇 Build-up land	0.55	6.40	9.99	1.47	5.56	4.33	0.04	1.10
沙漠 Desert land	13.92	16.19	172.87	45.55	76.34	41.61	103791.84	2.74
裸地 Unused land	21.11	46.02	174.50	162.95	49.11	127.10	0.94	122776.37

(4) 荒漠化改善: 内蒙古有 20% 左右的国土面积为各类沙漠、沙地和裸地等荒漠类型所占据, 曾经在 90 年代初由于人为扰动导致的严重荒漠化, 在近十年里出现了程度较轻的改善, 10 a 间, 沙漠面积基本维持而裸地面积则减小了 306.2 km² (图 3.d)。从空间上看, 巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠的南部以及科尔沁沙地的南部均有较大面积的沙漠沙地或裸地转为林草地等生态系统, 实现了荒漠化有效改善, 但同时乌兰布和沙漠北部、科尔沁沙地东部和北部以及呼伦贝尔沙地西部则有小区域的土地出现轻度荒漠化。

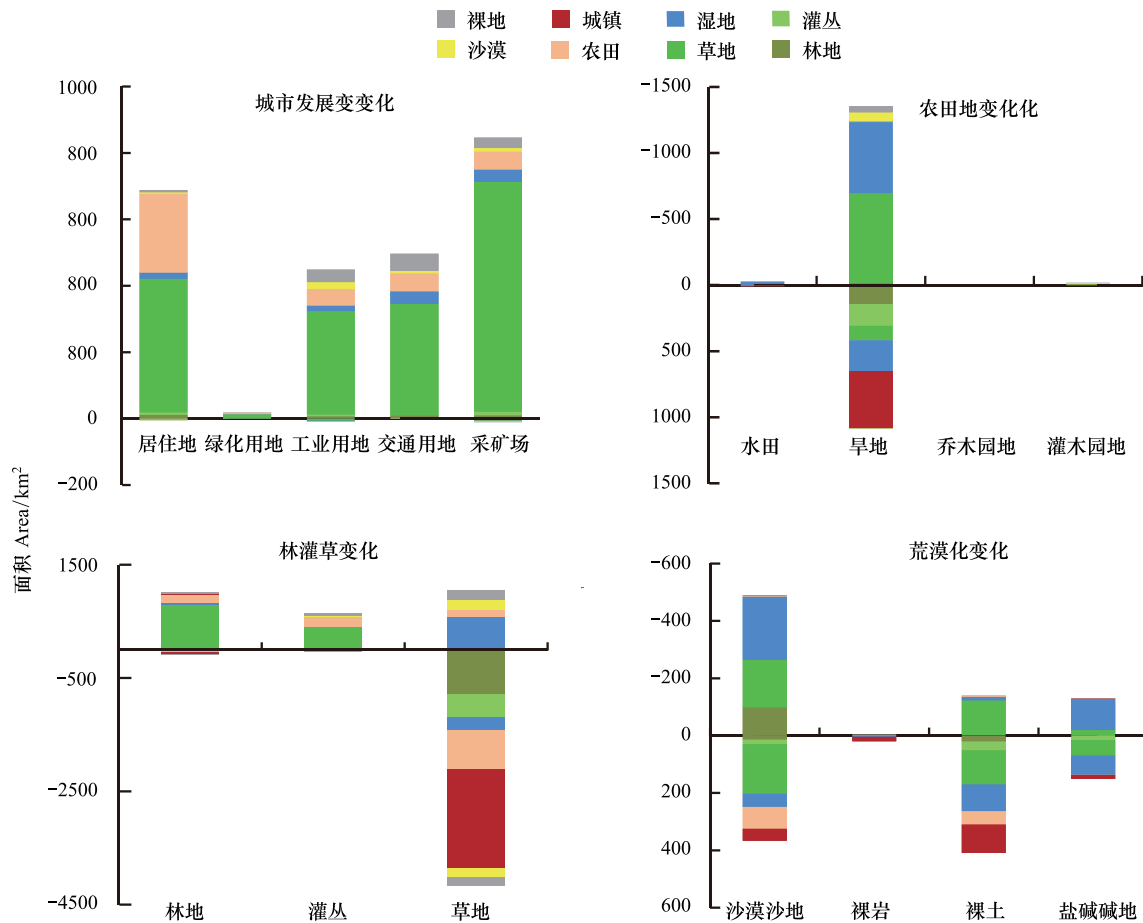


图 3 内蒙古土地利用转移特征

Fig.3 The characteristics of the land use type transferring in Inner Mongolia

图中正值代表转入面积, 负值代表转出面积

3.2 内蒙古风蚀计算结果及其验证

本研究采用 RWEQ 进行了内蒙古 2000 年和 2010 年潜在风蚀和实际风蚀的计算, 依据水利部《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007) 风蚀分级标准对结果进行了风蚀强度分级, 并在计算结果的基础上进一步获得了两年的固沙物质量 (图 4)。内蒙古风蚀分布总体上为东低西高, 北多南少, 这也是内蒙古自然地理和气候分布的特点所致。2010 年内蒙古全区风蚀总面积为 53.15 万 km², 中度以上风蚀发生面积合计为 29.66 万 km², 占全部风蚀区面积的 56.5%。2010 年内蒙古固沙物质量总量为 57.58 亿吨, 科尔沁沙地、浑善达克沙地以及鄂尔多斯高原是固沙物质量较多的区域 (图 4)。

鉴于固沙功能无监测或试验数据以供验证, 本文以基于卫星遥感数据监督分类得到的土壤流失遥感调查中内蒙古各旗县不同风蚀级别的面积与本模型计算评价分级结果进行了对比分析, 结果显示 (图 5), 二者具有较高的拟合性 ($R^2 = 0.89$), 从侧面说明了 RWEQ 模型用于评估内蒙古风蚀强度并以此计算固沙物质量的可行性。

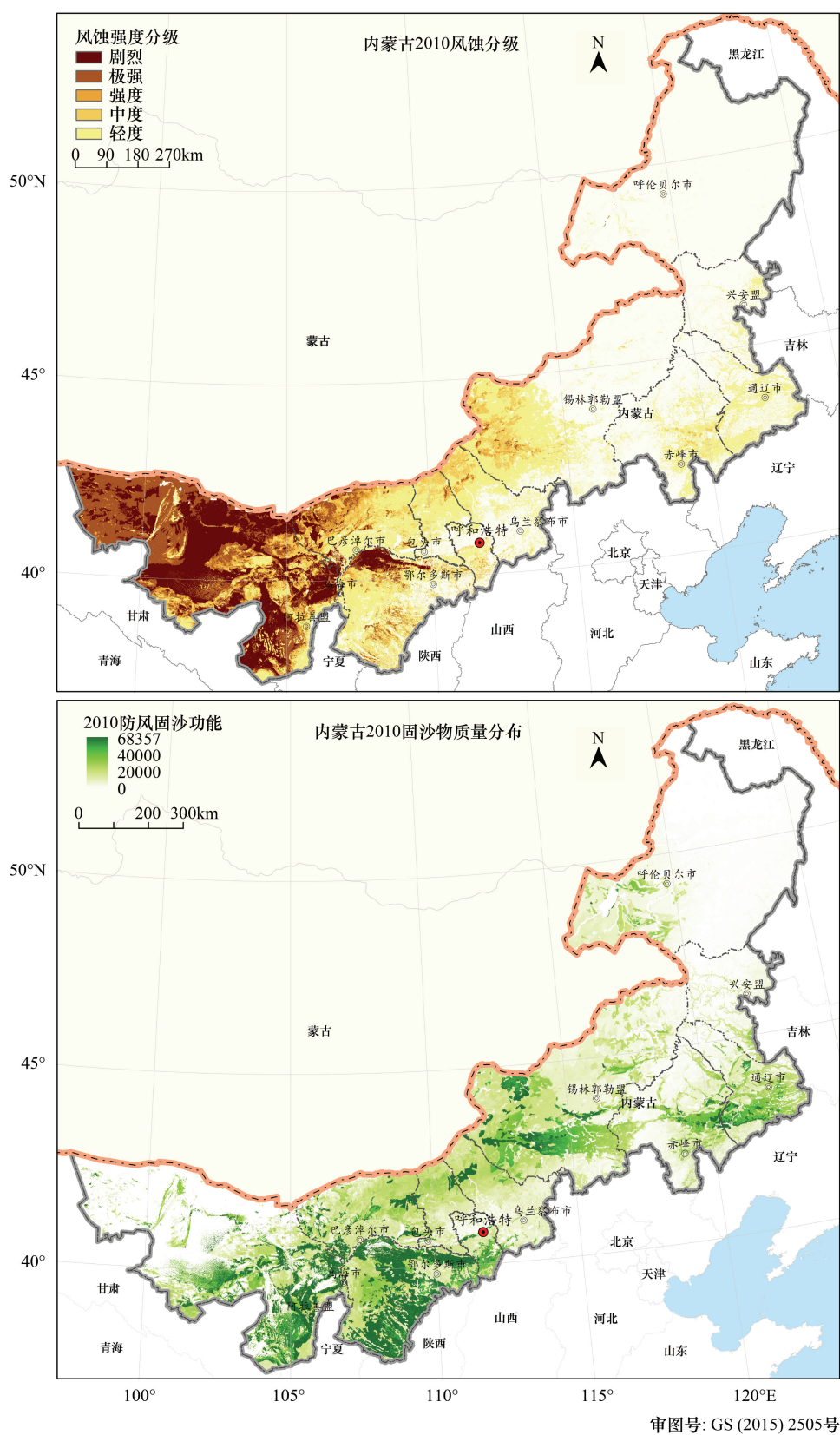


图4 2010 内蒙古风蚀分级和固沙物质量分布图

Fig.4 The Wind erosion classification and sand fixation amount distribution of Inner Mongolia in 2010

3.3 内蒙古固沙功能对土地利用变化的响应

3.3.1 土地利用类型与固沙物质量

基于 GIS 软件下将 2 个时期的土地利用类型图与相应的固沙物质量分布图分别进行叠加统计分析,得到 2 个时期不同土地利用类型下的固沙量。由表 3 可见,内蒙古各土地利用类型固沙物质量序列依次为草地>沙漠>农田>灌丛>裸地>林地>城镇,草地是控制内蒙古风力侵蚀,起到防风固沙作用的主要土地利用类型,草地固沙物质量在 2000 年和 2010 年两个年份中分别占到固沙物质总量的 67.9%和 63.9%,湿地如湖泊、河流等类型由于在计算中假设其不发生任何形式的风蚀,因此不做固沙物质量序列比较,其所产生的少量固沙物质量是由于湿地转为其他用地类型出现风蚀后同时产生相应的固沙能力。10 a 间,固沙物质总量增长了 8.68 亿吨,增幅为 17.75%,在全部变化中,土地利用变化造成的固沙物质变化量为 0.44 亿吨,虽然总量不大,但是在人类活动主导下的土地利用变化对生态系统固沙功能的影响意义重大。10 a 间,各个土地利用类型的固沙总量均有所增加,但林地、湿地和农田有微量的减少。(表 3)

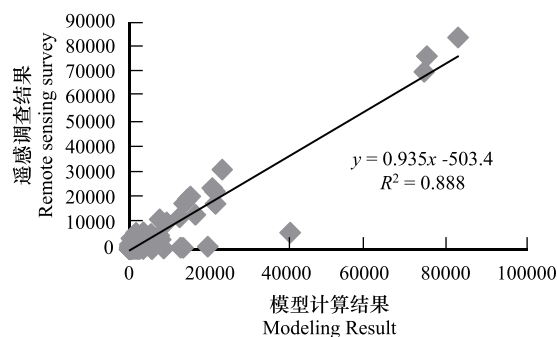


图 5 RWEQ 计算结果与遥感调查结果关系

Fig. 5 Relationship between the remote sensing result and RWEQ result

表 3 内蒙古不同土地利用类型固沙物质量及其变化(亿吨)

Table 3 The amount of sand fixation by different land use type and change in Inner Mongolia

年代 Year	林地 Forest land	灌丛 Shrub land	草地 Grassland	湿地 Wetland	农田 Cultivated land	城镇 Build-up land	沙漠 Desert land	裸地 Unused land
2000	1.53	1.69	33.21	0.27	4.95	0.30	5.48	1.44
2010	1.45	2.23	36.81	0.22	4.39	0.35	9.31	2.78
变化 Change	-0.08	0.54	3.60	-0.05	-0.56	0.05	3.83	1.35

3.3.2 防风固沙功能与土地利用变化

通过对 2000 年和 2010 年土地利用变化图(图 6.a)和固沙物质量变化图(图 6.b)的叠加,可统计分析不同土地利用类型之间的转化对固沙功能的影响。结果表明,土地利用类型之间的转换分别造成了 0.25 亿吨的固沙物质量的增加和 0.19 亿吨固沙物质量的减少。影响固沙功能的用地类型的转换主要在林灌草等自然生态系统用地与城镇、农田和荒漠之间进行,表 4 是对固沙功能增加和减少影响力分别位列前 20 种的土地转变形式,其中:农田的退耕(农田转灌丛、农田转草地)、荒漠的改造(裸地转灌丛、裸地转草地、裸地转农田)、沙漠的逆转(沙漠沙地转林灌草、沙漠转农田)以及草地质量的提高(低覆盖度草地转中覆盖度草地、中覆盖度草地转灌丛)等转换类型增加了 90.6%的固沙物质量;而农田开垦(中覆盖度草地转农田、草本沼泽转农田)、城镇发展(中覆盖度草地转城镇、农田转城镇)、荒漠化(中覆盖度草地转沙漠、湖泊转沙漠)以及湿地萎缩(河流和草本沼泽转中覆盖度草地)和草地的退化(高覆盖度草地转中覆盖度草地、中覆盖度草地转低覆盖度草地)等转换方式累计减少了 89.65%的固沙物质量。

值得注意的是,中、低覆盖度草地、旱地等土地利用类型在向林地转换的过程中,固沙能力有所降低,以中覆盖度草地转为林地后降低最多,为固沙物质降低总量的 2.67%,其次为农田转为林地。草地和农田向林地的转换大多是人为造林活动的结果,新造林地在生长初期无论其生物量抑或植被覆盖程度都远低于自然草地甚或农田,导致了短期内地表植被的保护作用下降,固沙功能的轻度降低。

综合来说,10 a 间,内蒙古的土地利用类型的变化对区域固沙功能起到了一定的增强作用,而这种增强并不以某类土地利用类型面积的增减为绝对导向,而是与生态系统质量高度相关,如草地覆盖度得以提升的地区,固沙物质量往往会大幅增加,而草地覆盖度下降的区域固沙物质量明显下降。

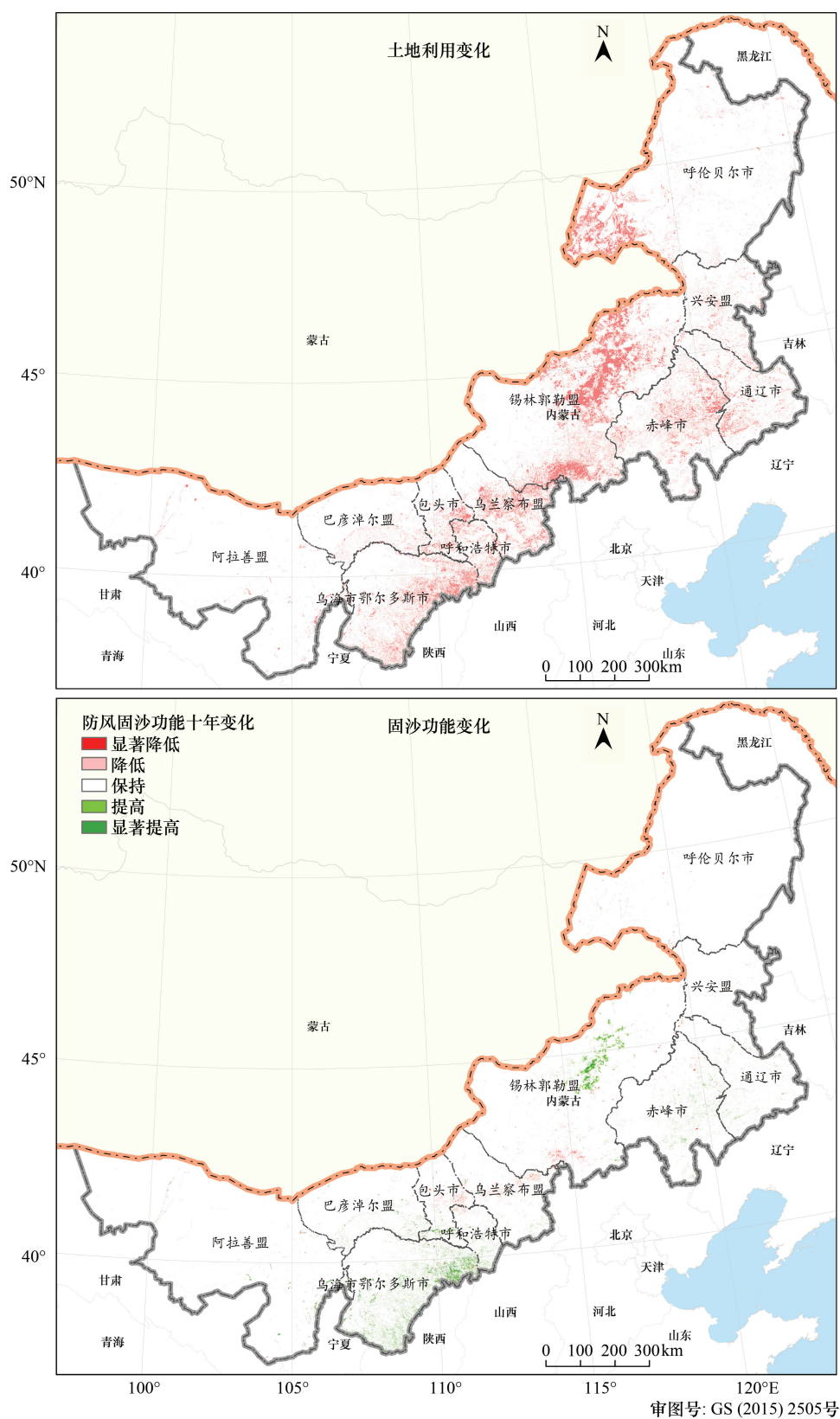


图 6 内蒙古土地利用和固沙功能空间变化

Fig.6 The spatial change of Environment Index and Sand Fix function in Inner Mongolia

图 a 中土地利用类型在两个年份间发生变化的区域即以红色表示,图 b 为两个年份固沙总量的差值,其中差值大于 0 为提高,大于 1000 为显著提高,反之,小于 0 为降低,小于 -1000 为显著降低

4 结论与讨论

土地利用结构与土壤水分、养分、水土流失等生态过程之间关系的研究,是近年来景观格局与生态过程研究的重要方面。土地利用及其结构的变化不仅能够改变自然景观的面貌,而且深刻影响着景观中的物质循环和能量流动,改变着土壤水分、养分和土壤侵蚀等生态过程的时空分布。对土地利用变化和生态质量与功能的关系探讨有助于把握土地利用变化的生态环境效应和环境功能影响,对探讨区域生态环境的变化具有重要的意义^[42]。在 GIS 和 RWEQ 模型支持下,本研究对内蒙古自治区土地利用变化特征与生态质量和固沙功能的关系进行深入的分析与探讨,结果表明:

(1)近 10 a 来,内蒙古地区土地利用变化的主要特点是城市的快速扩张和草地、湿地资源的高强度开发利用。农田总量微度增长的表象下实际是农田空间上的剧烈更替,原有农田被大面积转换为建设用地以及政策退耕为林灌草等用地类型,同时又以大面积灌丛、草地和湿地等用地类型开垦为新的农田予以替代。

表 4 不同土地利用转变类型固沙物质量变化及其占比

Table 4 The change amount and rate of sand fixation in different land use transformation types

固沙功能增加 Increased sand fixing function				固沙功能降低 Reduced sand fixing function			
2000	2010	增加量 Increased / $\times 10^4$ t	占比 Rate /%	2000	2010	降低量 Reduced / $\times 10^4$ t	占比 Rate /%
低覆盖草地	中覆盖草地	1731.29	69.67	中覆盖草地	低覆盖草地	-1492.55	-77.40
沙漠	低覆盖草地	171.67	6.91	高覆盖草地	中覆盖草地	-74.49	-3.86
裸土	低覆盖草地	94.83	3.82	中覆盖草地	林地	-51.48	-2.67
低覆盖草地	灌丛	52.80	2.12	中覆盖草地	沙漠	-50.39	-2.61
旱地	灌丛	34.89	1.40	中覆盖草地	旱地	-43.40	-2.25
裸地	旱地	27.04	1.09	草本沼泽	旱地	-23.24	-1.21
沙漠沙地	稀疏灌丛	26.37	1.06	旱地	林地	-16.75	-0.87
低覆盖草地	裸地	22.49	0.91	中覆盖草地	采矿场	-10.18	-0.53
沙漠	灌木园地	18.39	0.74	旱地	交通用地	-8.09	-0.42
沙漠	稀疏林地	18.22	0.73	中覆盖草地	交通用地	-7.42	-0.38
裸土	稀疏灌丛	15.75	0.63	草本沼泽	中覆盖草地	-4.76	-0.25
沙漠沙地	旱地	14.19	0.57	低覆盖草地	林地	-4.59	-0.24
盐碱地	低覆盖草地	14.13	0.57	草本沼泽	水田	-4.07	-0.21
低覆盖草地	灌木园地	14.04	0.57	旱地	居住地	-3.91	-0.20
旱地	低覆盖草地	9.71	0.39	湖泊	沙漠	-3.31	-0.17
裸土	灌木园地	6.73	0.27	湖泊	中覆盖草地	-3.23	-0.17
低覆盖草地	稀疏灌丛	4.95	0.20	中覆盖草地	灌丛	-2.01	-0.10
沙漠	灌丛	4.15	0.17	湖泊	旱地	-1.71	-0.09
盐碱地	稀疏灌丛	3.11	0.13	中覆盖草地	居住地	-1.51	-0.08
裸土	中覆盖草地	2.84	0.11	林地	旱地	-1.18	-0.06

(2)在退耕还林还草等生态保护工程的用地政策导向下,林地、灌丛面积得到了一定程度的恢复,,荒漠化逆向发展有所增加,荒漠总面积开始减小。草地面积虽然在向城市建设用地和农耕地的转换过程中大幅度减少,并且局部区域的禁牧轮牧使草地覆盖度有所增加,但过度放牧、破坏草地矿业开采、虫鼠害和气候等原因也导致了部分区域草地质量明显下降。总体而言,10 a 间内蒙古生态环境质量整体改善,局部地区存在一定恶化趋势。

(3)基于 RWEQ 模型的内蒙古固沙物质量估算结果表明,10 a 来,内蒙古固沙物质量的增减在空间上交替更迭,但总体来说固沙物质量相对 10 a 前增长了 17.75%,达到 2010 年的 57.54 亿吨,增长明显。草地固沙物质量在 2000 年和 2010 年两个年份中分别占到固沙物质总量的 67.9%和 63.9%,是内蒙古防风固沙功能的

主要土地利用类型。

(4) 基于叠加分析统计,土地利用类型的变化中的农田退耕、荒漠逆转、草地盖度提高等转换方式贡献了 90.6% 的固沙物质量的增长,而农田开垦、城镇发展、荒漠化发展、湿地萎缩以及草地的退化造成了 89.9% 的固沙物质量的减少,综合来看,内蒙古的土地利用变化对区域固沙功能起到了一定的增强作用,生态系统质量的变化造成的土地利用类型的转化对固沙功能的影响远高于在人类干扰下的土地利用类型的转换所造成的影响。

在 2000 年到 2010 年的 10 a 间,在退耕还林、还草等环保工程的实施以及禁牧轮牧等措施对草地的保护性管理的大背景下,内蒙古自治区整体生态质量得以维持并有小幅度增长,全区固沙功能得到了一定程度的增强。但是同时,城市建设速度过快对农田、草地和湿地资源造成了较大的压力,草地、农田的荒漠化现象依旧存在,部分草地生态系统受气候和人为因素的双重影响而出现质量降低,部分农田和草地在向林地转变的过程中会出现短期的地表覆盖下降,地表保护力降低的现象,这些问题的存在往往会弱化生态系统固沙功能,在今后的土地利用规划与管理中需要加以注意和调整:(1) 合理控制城镇扩张方式和规模,在规划中尽可能提高现有城区的承载力和加强对老城区的改造,减少摊大饼式的城市发展模式,降低城市周边农田和草地的占用速度。(2) 继续保证退耕还林还草等环保工程的实施力度,在退耕后的选择上应注意迎合周边自然条件,宜林则林,宜草则草,避免一刀切。(3) 对天然草地实施围栏封育轮牧,控制草地畜牧强度,防止过度放牧。(4) 加快人工草地建设和天然草地改良工作。(5) 加强草原鼠害治理,杜绝草原滥采滥挖,加强矿业开采施工管理,促进开采后的草地恢复,减少矿业开采对生态环境的影响。(6) 严格限制草地、湿地、林灌地的农业化,合理利用土地资源。

参考文献 (References):

- [1] Buschiazzo DE, Zobeck TM. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(12): 1839-1850.
- [2] Roels B, Donders S, Werger M J A, Dong M. Relation of wind-induced sand displacement to plant biomass and plant sand-binding capacity. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 979-982.
- [3] 贺山峰, 蒋德明, 阿拉木萨. 植被的防治风蚀作用. *生态学杂志*, 2007, 26(5): 743-748.
- [4] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 刘玉璋. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 31-33.
- [5] 唐艳, 刘连友, 屈志强, 胡霞, 郭兰兰, 吕艳丽, 曹恒武, 贾振杰, 杨岩岩. 植物阻沙能力研究进展. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 43-48.
- [6] 傅伯杰. *生态系统服务与生态安全*. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [7] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响—以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [8] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 李宗善, 杨荣金. 黑河中上游地区 2000-2010 年土地利用变化及水土保持服务功能. *生态学报*, 2014, 34(23): 7013-7025.
- [9] Daily G, Postel S, Bawa K S, Kaufman L. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems* [M]. Washington D. C.: Island Press, 1997.
- [10] 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能与可持续发展、社会-经济-自然复合生态系统可持续发展研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
- [11] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [12] 李文华. 生态系统服务研究是生态系统评估的核心. *资源科学*, 2006, 28(4): 4-4.
- [13] 韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 刘成程, 高馨婷. 黑河下游重要生态功能区植被防风固沙功能及其价值初步评估. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 58-65.
- [14] 高君亮, 郝玉光, 丁国栋, 刘芳, 辛智鸣, 徐军, 张景波, 赵英铭. 乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(12): 41-46.
- [15] 慈龙骏. *中国的沙漠化及其防治* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [16] Lal R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects// Lal R, ed. *Soil Erosion Research Methods*, 2nd ed. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1994: 1-9.

- [17] Callot Y, Marticorena B, Bergametti G. Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara Desert. *Geodinamica Acta*, 2000, 13(5): 245-270.
- [18] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1998, 17(4): 319-464.
- [19] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 416-426.
- [20] Copeland NS, Sharratt BS, Wu JQ, Foltz RB, Dooley JH. A wood-strand material for wind erosion control: effects on total sediment loss, PM_{10} vertical flux, and PM_{10} loss. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(1): 139-148.
- [21] De Longueville F, Henry S, Ozer P. Saharan dust pollution: implications for the Sahel? *Epidemiology*, 2009, 20(5): 780-780.
- [22] 康晓风, 张建辉, 刘红辉. 沙尘天气对我国城市空气质量影响的范围和强度分析. *资源科学*, 2002, 24(4): 1-4.
- [23] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 张增祥, 王一谋, 周自江, 鞠洪波, 黄签. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. *地理学报*, 2000, 55(5): 513-521.
- [24] 郭勇涛. 沙尘天气对我国北方和邻国日本大气环境影响的初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [25] 王金玉, 李盛, 王式功, 尚可政. 沙尘污染对人体健康的影响及其机制研究进展. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1160-1165.
- [26] 王娟, 李宝林, 余万里. 近 30 年内蒙古自治区植被变化趋势及影响因素分析. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(2): 132-138.
- [27] 于国茂, 刘越, 艳燕, 胡云峰. 2000—2008 年内蒙古中部地区土壤风蚀危险度评价. *地理科学*, 2011, 31(12): 1493-1499.
- [28] 沈建国, 白美兰, 李云鹏. 气候变化和人类活动对内蒙古生态环境的影响. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 84-91.
- [29] 刘全友, 童依平. 北方农牧交错带土地利用现状对生态环境变化的影响——以内蒙古多伦县为例. *生态学报*, 2003, 23(5): 1025-1030.
- [30] 恩和. 草原荒漠化的历史反思: 发展的文化维度. *内蒙古大学学报: 人文社会科学版*, 2003, 35(2): 3-9.
- [31] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. *中国农业科学*, 1997, 30(6): 1-9.
- [32] 李青丰, 李福生, 斯日古楞, 段新乔. 沙化草地春季禁牧研究初报. *中国草地*, 2001, 23(5): 41-46.
- [33] 胡云峰, 刘纪元, 齐永青, 师华定. 内蒙古农牧交错带生态工程成效实证调查和分析. *地理研究*, 2010, 29(8): 1452-1460.
- [34] 张永军. 国家重点生态工程实施的成效和问题及政策建议——以内蒙古自治区为例. *农业现代化研究*, 2014, 35(2): 178-182.
- [35] Wei S G, Dai Y J, Liu B Y, Zhu A X, Duan Q Y, Wu L Z, Ji D Y, Ye A Z, Yuan H, Zhang Q, Chen D D, Chen M, Chu J T, Dou Y J, Guo J X, Li H Q, Li J J, Liang L, Liang X, Liu H P, Liu S Y, Miao C Y, Zhang Y Z. A China dataset of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212-224.
- [36] 欧阳志云, 张路, 吴炳方, 李晓松, 徐卫华, 肖懿, 郑华. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系. *生态学报*, 2015, 35(2): 219-226.
- [37] Skidmore EL, Tatarko J. Stochastic wind simulation for erosion modeling. *Transactions of the ASABE*, 1990, 33(6): 1893-1899.
- [38] Fryrear DW, Krammes CA, Williamson D L, Zobeck TM. Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1994, 49(2): 183-188.
- [39] Hagen LJ, Skidmore EL, Saleh A. Wind erosion: Prediction of aggregate abrasion coefficients. *Transactions of the ASABE*, 1992, 35(6): 1847-1850.
- [40] Bilbro JD, Fryrear DW. Wind erosion losses as related to plant silhouette and soil cover. *Agronomy Journal*, 1994, 86(3): 550-553.
- [41] 李军, 游松财, 黄敬峰. 基于 GIS 的中国陆地表面粗糙度长度的空间分布. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2006, 24(2): 185-189.
- [42] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 孟庆华, 赵文武. 土地利用结构与生态过程. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 185-189.