

# 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益

韩永伟, 拓学森, 高吉喜, 高馨婷

(中国环境科学研究院生态所, 北京 100012)

**摘要:**分析生态系统服务功能的流动特征是加强区域生态系统管理, 制定生态补偿政策的重要基础。针对生态系统服务功能的流动特性, 探索提出了生态系统服务功能辐射效益的概念与内涵, 并利用 2006 年 7 月 TERRA-1 MODIS 250m × 250m 分辨率 NDVI 数据, 在地理信息系统技术支持下, 采用风蚀输沙率模型和沙尘空间传输模型, 评估了黑河下游重要生态功能区防风固沙功能的辐射效益。结果表明: (1) 2006 年黑河下游重要生态功能区防风固沙总量达到 14990 万 t, 低覆盖度草地防风固沙量最高, 占总量的 80% 以上, 灌木林的防风固沙量其次, 占总量的 12.5%, 有林地的防风固沙量最小, 仅为 320 万 t; (2) 不同植被类型的防风固沙能力也存在较大差异, 单位面积有林地的防风固沙能力最强, 为 22695t/km<sup>2</sup>, 灌木林其次, 低覆盖度草地的防风固沙能力最低; (3) 区域生态系统对粒径介于 10μm 和 20μm 之间的沙尘固定功能的辐射范围可以达到北京、天津、河北、山东等 15 个省(市、区), 辐射面积达 115.3 万 km<sup>2</sup>; 区域生态系统对粒径介于 20μm 和 400μm 之间的沙尘固定功能的辐射范围包括内蒙古阿拉善左旗和阿拉善右旗两个行政区域, 辐射面积为 5.2 万 km<sup>2</sup>; (4) 研究区生态系统可以减少下风向区域的风沙量为 5996 万 t, 防风固沙功能的直接辐射效益达 89.94 亿元, 是该区当年 GDP 的 8.6 倍。内蒙古自治区享受到的辐射效益最大, 达 30.40 亿元, 上海市享受到辐射效益最小, 为 0.10 亿元, 仅占总辐射效益的 0.11%。最后, 分析了本研究的局限性及今后需要努力的方向。

**关键词:**重要生态功能区; 防风固沙; 服务功能; 辐射效益

## Ecosystem services radiation of significant eco-function area in the lower reaches of Heihe River

HAN Yongwei, TUO Xuesen, GAO Jixi, GAO Xinting

Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** The significant eco-function area is a new concept, which is put forward by the department of environment management in recent years. It plays more and more important role in protecting national and regional ecological security. Analyzing the spatial transfer characteristics of ecosystem services of the significant eco-function area is the basic work of strengthening the regional ecosystem management and establishing the policy of ecological compensation. Based on the review of progress of ecosystem services research, the concept of ecosystem services radiation effect is put forward and the connotation of sand-fixing function and its radiation is emphasized and analyzed in this paper. The significant eco-function area in the lower reaches of Heihe River is one of planned eco-function area of primary sand-fixing function in China, which is in west Inner Mongolian Autonomous Region. The area is one of four main sand land and dust sources in China, so it is very important to quantitatively analyse the sand-fixing function and its radiation benefit. Using the TERRA-1 MODIS 250m 250m NDVI time series data on July, 2006, under the supporting of GIS, using the wind erosion and sand transporting models, the radiation benefit of the sand-fixing function was evaluated. The results show that the amount of sand-fixing is  $1.499 \times 10^8$  t in 2006, the sand-fixing of the low covered grassland is the biggest and occupies 80% of the total, the sand-fixing of the shrubby land is secondly and occupies 12.5% of the total, the sand-fixing of the forest land is smallest and only  $320 \times 10^4$  t; as a whole, the sand-fixing ability is lower, the sand-fixing per unit area of the different vegetation cover

**基金项目:** 环保公益性行业科研专项(200709007); 国家“十一五”科技支撑计划课题(2009BAD2B03)

**收稿日期:** 2009-12-28; **修订日期:** 2010-07-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanyw@craes.org.cn.

is very different, the forest land is  $22695 \text{ t/km}^2$  and highest, shrubby land is  $22605 \text{ t/km}^2$  and secondly, and the low cover grassland is only  $12338 \text{ t/km}^2$  and smallest; the radiation scope of regional sand-fixing function for the sand diameter between  $10 \mu\text{m}$  and  $20 \mu\text{m}$  can reach 15 provincial districts, such as Beijing, Tianjin, Hebei, Shandong, and so on, and the sand-fixing function radiation covers a total area of  $115.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ . But the radiation scope of regional sand-fixing function for the sand diameter between 20 m and 400 m only can reach Alashan Left Banner and Alashan Right Banner in Inner Mongolia, and the sand-fixing function radiation covers a total area of  $5.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ . The radiation amount of the leeward region is  $5996 \times 10^4 \text{ t}$ , which is equivalent to 49.8 t per square kilometer. Its direct radiation benefit is  $89.94 \times 10^8$  Yuan RMB (1.3 billion \$) which is 8.6 times as much as the GDP of the study area in 2006. The spatial distribution of radiation benefit is of huge difference because of the different area of radiation regions. The Inner Mongolian Autonomous Region gains the biggest radiation benefit, which is  $30.40 \times 10^8$  Yuan RMB and occupies 33.8% of the total radiation benefit. The Shanghai City gains the smallest radiation benefit and only occupies 0.11% of the total. There are some limitations in this research because of data and method restriction. So the more in-depth studies should be carried in the future such as the ecological mechanism, the indices and methods of ecosystem services radiation, and the indirect social benefits of ecosystem services.

**Key Words:** significant eco-function area; sand-fixing function; ecosystem services radiation

生态系统服务功能是人类福祉的源泉,在千年生态系统评估的推动下,以生态系统服务为核心的系统评估已成为当代生态学研究的前沿领域<sup>[1]</sup>。国外科学家,从20世纪70年代就开始了生态系统服务功能及其价值的评估工作<sup>[2]</sup>,多年来在全球或区域生态系统<sup>[3-6]</sup>、流域生态系统<sup>[7-9]</sup>、单个生态系统和物种生物多样性<sup>[10-13]</sup>等方面取得了大量的研究成果<sup>[14]</sup>。在我国,生态系统服务功能研究近十年来得到了迅猛发展,科技工作者在区域生态系统<sup>[15-16]</sup>、草地生态系统<sup>[17-18]</sup>、森林生态系统<sup>[19-21]</sup>、湿地生态系统<sup>[22-23]</sup>、农田生态系统<sup>[24-25]</sup>、荒漠生态系统<sup>[26-27]</sup>、城市生态系统<sup>[28-29]</sup>和自然保护区<sup>[30-31]</sup>等不同类型的不同尺度生态系统的服务功能及其价值评估方面进行了积极的探索。

目前来看,所开展的研究以普查性的居多,即对一个区域内的生态系统服务功能的重要性及其价值进行概述式的研究<sup>[32]</sup>。关于区域生态系统服务功能的流动,即生态系统的某些服务功能通过某些途径在空间上流动到系统之外的地区产生辐射效能的研究报道还很少见到。然而,许多重要生态系统服务功能都具有空间流动的特性,这种特性使得生态系统服务功能可以在比其栖息地大得多的范围内产生经济价值<sup>[32]</sup>。分析一个区域生态系统服务功能的辐射效益(空间流动),对于不同尺度生态系统服务功能转换与关联等生态学机制<sup>[33]</sup>研究,以及不同尺度区域生态系统服务功能的协调与管理<sup>[34]</sup>,生态补偿政策的制定具有重要意义。

重要生态功能区是近几年提出的概念,因其在保持流域、区域生态平衡,减轻自然灾害,确保国家和地区生态环境安全方面具有举足轻重的作用<sup>[35]</sup>,所以引起了党和国家的高度关注。《中华人民共和国国民经济和社会发展规划第十一个五年规划纲要》中明确提出要在限制开发区域建立重要生态功能区。重要生态功能区与自然保护区有所不同,除了重视本区内生态系统服务价值的保护外,更加注重其对周边其它区域服务价值的维护。因此,开展重要生态功能区生态系统服务功能由空间流动而产生的辐射效益的评估研究就显得非常必要。本文以规划建设的黑河下游重要生态功能区为研究对象,对其主导生态系统服务功能的辐射效益进行了初步评估,以期为重要生态功能区辐射效益的研究以及黑河流域生态系统的保护与管理提供一定的理论参考。

## 1 生态系统服务功能辐射效益的概念与内涵

### 1.1 辐射效益的概念

生态系统服务功能并不等同于生态系统功能。依照“系统结构-系统功能-系统服务”的关系,一定的生态系统结构形成一定的生态系统功能,这一过程在同一空间上实现;但是从生态系统功能到生态系统服务功能

却可能发生在不同的空间上,如从栖息地内部到外部,即生态系统服务功能的空间流动(转移)<sup>[32]</sup>。这种生态系统服务功能的空间流动会给远离栖息地的地方带来效益,如一个流域中的上游地区的水源涵养功能可以为中下游经济社会的发展提供生态保障。因此,一个区域生态系统的服务功能不仅会造福区域本身,还具有通过某些途径向该区范围以外的地区辐射的特征。而要实现生态系统服务功能从一个地区向另一个地区的辐射,其空间流动的媒介应该是可运动的。生态系统服务功能的辐射效益是指一个区域生态系统功能所产生的服务及其价值通过水、空气等流通介质流动到区域以外其它地方的范围与强度。

## 1.2 辐射效益的内涵

一个区域的生态系统服务功能的实现具有复杂性:生态系统服务功能是否可以表现出来,取决于当地的自然地理条件、社会经济发展状况等多种因素。如对于某些民族而言,特定的动物具有某些宗教象征意义,这些动物不能作为产品供应给人类,其物质生产的服务功能在当地是无法实现的;在常年少雨的坡地上,植被生态系统提供的防止水土侵蚀的服务就难以实现,应该将生态系统服务功能分为潜在的和现实的两种类型<sup>[36]</sup>。因生态系统服务功能辐射效益的实现,依赖于生态系统服务功能的实现,所以生态系统服务功能的辐射效益可以概括的分为现实的辐射效益与潜在的辐射效益两大类。具体来讲,生态系统服务功能的辐射效益大致可以包括以下几个方面:

①物质生产功能辐射效益 生态系统生产食物、药品、木材等人类生产、生活所需物质的功能从原产地转移到产地外其它地方所产生的效能。

②土壤保持功能辐射效益 植被发育良好的区域,由于植被和枯落物的保护,减少雨水对土壤的侵蚀,保持土壤的功能体现在避免下游区域湖泊、河流和水库泥沙淤积的效果和价值。

③水源涵养功能辐射效益 上游集水区域植被与土壤所涵养的水分通过河流水系等输水通道转移到中下游地区产生的服务效用。

④洪水调蓄功能辐射效益 森林、湿地和湖泊等生态系统所具有的调节洪峰、储蓄洪水功能对减少系统外其它区域洪灾损失的功效。

⑤气候调节功能辐射效益 一个区域的生态系统具有的固碳释氧,调节温度、降水等调节大气候及局部气候的功能在区域外其它地方产生的服务于人类的价值。

⑥防风固沙功能辐射效益 在风沙源区,由于植被的作用减少大风对土壤表层颗粒吹扬,避免下风向区域沙尘灾害发生的范围与强度效应。

⑦空气净化功能辐射效益 区域生态系统具有的吸收二氧化硫等大气污染物的功能在区域外产生的污染物消减作用与效益。

## 1.3 防风固沙功能及其辐射效益

在风蚀过程中,植被可通过多种途径对地表土壤形成保护,减少风蚀输沙量。首先,地表植被可以通过根系固定表层土壤,改良土壤结构,减少土壤裸露的机会,进而提高土壤抗风蚀的能力;其次,植被可以通过增加地表粗糙度、阻截等方式提高起沙风速、降低大风动能,从而消弱风的强度和携沙能力,减少土壤流失和风沙危害。植被拥有的这种保持土壤、减少风力侵蚀的功能即为防风固沙功能。

植被的防风固沙功能具有空间流动的特性,即一个区域植被的防风固沙功能不仅对当地产生生态效益和作用,而且会通过风等流通介质发生流动,对周边区域也产生效用。区域植被的防风固沙功能对本地的生态效益主要体现在保持土壤肥力、减少表土流失和保护土地资源等方面,而对其下风向区域的生态效益则主要表现为减少降尘和风沙危害等方面,即一个区域植被防风固沙功能对当地和周边区域的生态效益表达是不同的。区域植被的防风固沙功能通过空间流动对下风向周边区域的生态效益的实现以该区植被防风固沙功能的实现为前提,其发生时间、范围与强度受植被覆盖状况、大风季节、风力强度、地形地貌等因素影响,同时具有随着距离的延伸和风速的减弱,在空间上呈现逐步衰减的变化特征。将植被防风固沙功能通过风力介质发生空间流动并对下风向区域产生生态服务的范围与强度称为防风固沙功能的辐射效益。

## 2 研究区概况

黑河下游重要生态功能区位于内蒙古自治区额济纳旗,其范围东至古居延泽、拐子湖、古日乃等盆地,与巴丹吉林沙漠边缘相接,北至中蒙边界,西至马鬃山余脉的低山丘陵与戈壁荒漠,南与甘肃金塔县交界。地理坐标为北纬  $40^{\circ}16'36''$ — $42^{\circ}41'54''$ ,东经  $99^{\circ}27'15''$ — $103^{\circ}1'19''$ 。东西宽约 290km,南北长约 270km,总面积 5.1 万  $\text{km}^2$ 。该区属于大陆性气候,冬季受蒙古高压气流控制,夏季受西风带影响,气候干燥,冬季寒冷,夏季炎热,降水稀少,年均降水量 37mm,年均蒸发量 3800—4000mm。1 月平均气温为  $-12.5^{\circ}\text{C}$ ,7 月平均气温为  $26^{\circ}\text{C}$ ,年均温  $8.3^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温达  $40^{\circ}\text{C}$  以上,极端最低气温  $-37.6^{\circ}\text{C}$ 。年日照时数为 3396h,无霜期 145d。全年八级以上大风日数平均 50d,多风月平均扬沙 21d,风期长达 5—6 个月,年均风速  $4.5\text{ m/s}$ ,年最大风速为  $24\text{ m/s}$ ,以西风和西北风为主。该区沙漠化敏感性和盐渍化敏感性高,防风固沙功能极重要,存在的主要生态问题为黑河中游人工绿洲扩展和灌溉农业发展带来入境水量锐减,导致植被退化、沙化土地分布广泛、沙尘暴频繁。

## 3 评价方法

### 3.1 防风固沙量的估算

采用董治宝<sup>[37]</sup>建立的风蚀流失模型(式 1),分别计算研究区生态系统潜在和现实的土壤侵蚀量,取二者之差作为生态系统防风固沙量(式 2)。

$$Q = \int_t \int_x \int_y \{ 3.90(1.0413 + 0.04413\theta + 0.0021\theta^2 - 0.0001\theta^3) \cdot [V^2(8.2 \times 10^{-5})^{V_{CR}} S_{DR}^2 / (H^8 d^2 F)x, y, t] \} dx \cdot dy \cdot dt \quad (1)$$

式(1)中, $Q$  为风蚀量/ $\text{t}$ ;  $\theta$  为坡度/ $(^{\circ})$ ;  $V$  为风速/ $(\text{m/s})$ ,研究中取  $17\text{ m/s}$ ;  $V_{CR}$  为植被覆盖度/ $\%$ ,使用植被归一化指数估算;  $SDR$  为人为地表结构破损率/ $\%$ ,取 1;  $H$  为空气相对湿度/ $\%$ ,取 37%;  $d$  为土壤平均粒径/ $\text{mm}$ ,取  $0.2\text{ mm}$ ;  $F$  为土体硬度/ $(\text{N/cm}^2)$ ,取  $0.90\text{ N/cm}^2$ ;  $t$  为时间/ $\text{s}$ ,以该区大风日数 50d 进行换算;  $x, y$  为距离参照点距离/ $\text{km}$ 。

$$Q_c = Q_w - Q_s \quad (2)$$

式(2)中, $Q_c$  为防风固沙量/ $\text{t}$ ,  $Q_w$  为假设无植被覆盖情况下风蚀量/ $\text{t}$ ;  $Q_s$  为实际风蚀量/ $\text{t}$ 。

### 3.2 辐射距离估测

利用冯·卡曼<sup>[38-39]</sup>给出的沙尘粒子自沙面外移后在空中传输距离的经验公式(公式 3)估算大风条件下,不同粒径沙尘的水平传输距离。在 Arcgis 9.3 软件中以此距离做缓冲区,沿防风固沙功能区边界画出两条主要风向线(西风和西北风),截取缓冲区,得到防风固沙功能的辐射范围。

$$I = \frac{40\varepsilon\mu^2u}{\sigma^2g^2d^4} \quad (3)$$

式(3)中, $I$  为沙尘粒子传输距离/ $\text{km}$ ;  $u$  为大风时的风速,取  $17\text{ m/s}$ ;  $\mu$  为运动粘性系数,一般取  $0.14\text{ cm}^2/\text{s}$ ;  $\varepsilon$  为湍流交换系数,在风速较大时取  $10^5\text{ cm}^2/\text{s}$ ;  $\sigma$  为沙粒密度,取  $1.4\text{ g/cm}^3$ ;  $d$  为沙粒直径,分别取  $10, 20\text{ }\mu\text{m}$  和  $400\text{ }\mu\text{m}$ ;  $g$  为重力加速度,取  $10\text{ m/s}^2$ 。



图 1 黑河下游防风固沙生态功能区地理位置

Fig. 1 The location of studied significant eco-function area

### 3.3 辐射效益估算

$$V_{\text{降尘}} = Q_c \times d_{<0.02} \times P_s \quad (4)$$

式(4)中, $V_{\text{降尘}}$ 为减少降尘的效益; $Q_c$ 为防风固沙量; $d_{<0.02}$ 为粒径小于0.02mm的土壤颗粒含量,采用粒径小于0.002mm和粒径在0.002—0.02mm的颗粒含量即15%和25%<sup>[40]</sup>分别进行估算并加和; $P_s$ 为清理单位降尘成本,采用工业粉尘排污收费标准150元/t进行估算。

### 3.4 遥感数据处理

遥感数据采用2006年7月TERRA-1 MODIS 250m×250m分辨率NDVI数据,在Arcgis 9.3软件支持下,提取研究区NDVI数据,进行相应处理和投影与坐标转换。投影方式为albers投影,地球椭球体采用Krasovsky 1940椭球体模型。

## 4 结果与分析

### 4.1 防风固沙功能评估

植被具有明显的防风固沙功能。植被覆盖度与土壤风蚀量呈负相关关系<sup>[41]</sup>,植被覆盖程度越差,表层土壤为强风提供沙尘的可能性危险性就越高。当植被盖度达到30%时,风洞试验中土壤的风蚀可以大幅减轻,当植被覆盖度达到35%—40%时几乎没有风蚀<sup>[42]</sup>。黑河下游重要生态功能区植被的防风固沙功能评估结果显示(表1),2006年该区实际风蚀量为29728万t,是没有植被情景下潜在风蚀量(44718万t)的66.5%,植被减少了14990万t的土壤风蚀。总体来看,由于研究区大部分区域为植被覆盖度很低的戈壁和沙地,因此生态系统的防风固沙能力较弱。不同植被类型的防风固沙能力也存在较大差异,单位面积有林地的防风固沙能力最强,为22695t/km<sup>2</sup>,低覆盖度草地的防风固沙能力最低,为12338t/km<sup>2</sup>,仅为有林地的54%。但是由于低覆盖度草地的分布面积较广,为9798 km<sup>2</sup>,是有林地面积(141 km<sup>2</sup>)的69.5倍,因此其总体的防风固沙量最大,为12089万t,占区域生态系统防风固沙总量的80%以上。

表1 黑河下游重要生态功能区防风固沙功能

Table 1 The analysis on soil conservation function of significant eco-function areas

|        | 面积<br>Area<br>/km <sup>2</sup> | 潜在风蚀量<br>Volume of potential<br>wind erosion<br>/(×10 <sup>4</sup> t) | 实际风蚀量<br>Volume of actual<br>wind erosion<br>/(×10 <sup>4</sup> t) | 防风固沙量<br>Volume of sand-fixing<br>/(×10 <sup>4</sup> t) | 单位面积固沙量<br>Volume of sand-<br>fixing of unit area<br>/(t/km <sup>2</sup> ) |
|--------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 低覆盖度草地 | 9798                           | 39334                                                                 | 27245                                                              | 12089                                                   | 12338                                                                      |
| 中覆盖度草地 | 370                            | 1484                                                                  | 777                                                                | 707                                                     | 19108                                                                      |
| 灌木林    | 829                            | 3332                                                                  | 1458                                                               | 1874                                                    | 22605                                                                      |
| 有林地    | 141                            | 568                                                                   | 248                                                                | 320                                                     | 22695                                                                      |
| 总计     | 11138                          | 44718                                                                 | 29728                                                              | 14990                                                   | —                                                                          |

### 4.2 辐射范围评估

沙粒粒径越小,大风作用下在空中传输的距离就越远<sup>[38]</sup>。评估结果表明(表2),研究区粒径为10μm的沙尘可以传输2460km,而粒径为20μm的沙尘仅能传播154km。在主导风向为偏西风的作用下,区域生态系统对粒径介于10—20μm的沙尘固定功能的辐射范围较大,包括河北、山东、北京、天津4个省(市)全部和吉林、甘肃、山西、辽宁、陕西、河南、安徽、江苏、内蒙古、宁夏、上海等省市的部分地区,辐射范围涉及到15个省(市、区),辐射总面积达115.3万km<sup>2</sup>;区域生态系统对粒径介于20—400μm的沙尘固定功能的辐射范围则较小,包括内蒙古阿拉善左旗和阿拉善右旗两个行政区域,面积为5.2万km<sup>2</sup>(表2,图2)。

### 4.3 辐射效益评估

分析生态系统防风固沙功能辐射到不同行政区域的情况,结果显示(表3):黑河下游重要生态功能区防风固沙功能具有显著的辐射效益。2006年该区生态系统减少下风向地区降尘量5996万t,每平方公里减少降尘的量达到49.8t,单位面积辐射效益价值为7463.9元/km<sup>2</sup>,减少降尘的直接环境效益达89.94亿元,是该

区当年 GDP(10.5 亿)的 8.6 倍。内蒙古自治区享受到的辐射效益最大,达 30.40 亿元,其次为河北、山东等省,上海市享受到辐射效益最小,为 0.10 亿元,仅占总辐射效益的 0.11%。

表 2 不同粒径沙尘的辐射距离和区域

Table 2 The radiation scope and regions of different size sand

| 土壤粒径<br>Soil particle<br>/ $\mu\text{m}$ | 传输距离<br>Transmission distance<br>/km | 辐射区面积<br>Areas of radiation regions<br>/ $(10^4\text{km}^2)$ | 辐射区域<br>Radiation regions                           |
|------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 10                                       | 2460                                 | 115.3                                                        | 河北、山东、北京、天津全部和吉林、甘肃、山西、辽宁、陕西、河南、安徽、江苏、内蒙古、宁夏、上海部分地区 |
| 20                                       | 154                                  | 5.2                                                          | 内蒙古部分地区                                             |
| 400                                      | 0.00096                              | —                                                            | —                                                   |

表 3 各区域辐射量和辐射效益

Table 3 The radiation amount and benefit of different district

| 地区<br>Region | 辐射区面积<br>Areas of<br>radiation regions<br>/ $(\times 10^4\text{km}^2)$ | 辐射量<br>Volume of<br>radiation<br>/ $(\times 10^4\text{t})$ | 辐射效益<br>Value of<br>radiation<br>/ $(\times 10^8\text{yuan})$ | 地区<br>Region | 辐射区面积<br>Areas of<br>radiation regions<br>/ $(\times 10^4\text{km}^2)$ | 辐射量<br>Volume of<br>radiation<br>/ $(\times 10^4\text{t})$ | 辐射效益<br>Value of<br>radiation<br>/ $(\times 10^8\text{yuan})$ |
|--------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 内蒙古          | 40.72                                                                  | 2026.60                                                    | 30.40                                                         | 河北           | 19.69                                                                  | 980.20                                                     | 14.70                                                         |
| 山东           | 16.57                                                                  | 824.69                                                     | 12.37                                                         | 山西           | 12.91                                                                  | 642.33                                                     | 9.63                                                          |
| 辽宁           | 11.57                                                                  | 575.62                                                     | 8.64                                                          | 江苏           | 7.19                                                                   | 357.87                                                     | 5.37                                                          |
| 陕西           | 4.06                                                                   | 202.06                                                     | 3.03                                                          | 河南           | 2.32                                                                   | 115.76                                                     | 1.74                                                          |
| 北京           | 1.75                                                                   | 87.31                                                      | 1.31                                                          | 天津           | 1.25                                                                   | 62.06                                                      | 0.93                                                          |
| 宁夏           | 0.96                                                                   | 47.67                                                      | 0.72                                                          | 安徽           | 0.78                                                                   | 38.68                                                      | 0.58                                                          |
| 吉林           | 0.31                                                                   | 15.57                                                      | 0.23                                                          | 甘肃           | 0.25                                                                   | 12.35                                                      | 0.19                                                          |
| 上海           | 0.14                                                                   | 6.99                                                       | 0.10                                                          | 总计           | 120.5                                                                  | 5996                                                       | 89.94                                                         |

不同植被类型对生态系统防风固沙功能的辐射效益贡献不同,低覆盖度草地的辐射效益贡献最大,达 72.53 亿元,占总辐射效益的 80.6%,其余依次为灌木林地、中覆盖度草地和有林地,对总体辐射效益的贡献率分别为 12.5%、4.7% 和 2.1%(表 4)。

## 5 讨论

(1)生态系统服务供给和人类福利实现的可分离性决定了生态系统服务可以在空间上流动,研究生态系统服务功能空间流动(转移)对于了解、使用和管理生态系统服务功能是非常重要的,是生态系统服务研究的一个重要问题<sup>[32,36]</sup>。本研究受生态系统服务功能相关研究成果的启发,基于生态系统服务功能的空间流动特性,探索提出了生态系统服务功能辐射效益的概念,即一个区域生态系统功能所产生的服务及其价值通过水、空气等流通介质转移到区域以外其它地方的范围与强度。由于受研究基础和认识局限等因素影响,这一概念的表述还只是个初步的思考,其内涵与外延有待今后进一步研究完善。

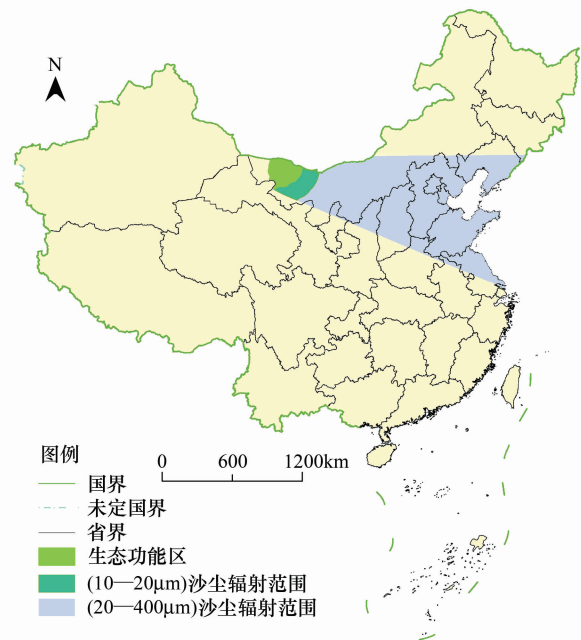


图 2 防风固沙功能辐射效益空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of sand-fixing function radiation scope

表 4 不同植被覆盖类型的辐射效益  
Table 4 The radiation benefit of different vegetation cover

| 项目 Item | 面积<br>Area<br>/km <sup>2</sup> | 辐射量<br>Volume of radiation<br>/( × 10 <sup>4</sup> t) | 辐射效益<br>Value of radiation<br>/( × 10 <sup>4</sup> 元) |
|---------|--------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 低覆盖度草地  | 9798                           | 4835.6                                                | 725340                                                |
| 中覆盖度草地  | 370                            | 282.8                                                 | 42420                                                 |
| 灌木林     | 829                            | 749.6                                                 | 112440                                                |
| 有林地     | 141                            | 128.0                                                 | 19200                                                 |
| 总计      | 11138                          | 5996.0                                                | 899400                                                |

(2) 区域生态系统服务功能的辐射效益评估,是探讨生态系统服务空间流动产生的区域生态公平问题,研究生态系统服务功能的跨区占用或不公平占用及其补偿机制的重要基础。本研究使用前人研究得出的风蚀流失模型与沙尘粒子的空中传输距离经验公式,评估了黑河下游重要生态功能区防风固沙功能的辐射效益。结果表明,2006 年研究区植被的防风固沙功能可以辐射到北京、天津、河北、山东等 15 个省(市、区),辐射面积达 120.5 万 km<sup>2</sup>,是研究区自身面积的 23.6 倍,减少下风向区域的降尘量达到 5996 万 t,在研究区外产生的辐射效益达 89.94 亿元。从这一不完全估算结果,可以发现黑河下游重要生态功能区生态系统防风固沙服务功能具有很强的辐射效益。

(3) 生态系统服务功能及其价值的评估目前尚没有形成一整套完备的评价理论、指标体系、实施原则<sup>[14,31]</sup>,特别是关于生态系统服务功能辐射效益的估算研究还很少见到。本研究是一次尝试性的工作,对生态系统防风固沙功能辐射范围与辐射价值的估算是 在一系列人为限定的条件下得出的,采用的遥感数据分辨率以及沙尘粒径范围、有效风蚀大风时数和价值的计算标准等一些参数的选取还不可能达到精确反映黑河下游生态功能区防风固沙功能辐射效益真实状况的程度。尽管如此,这样一个粗略的评估还是可以促进人们对生态系统服务功能辐射效益的了解和关注,为重要生态功能区生态系统辐射效益的评估以及区域生态保护政策的制定提供一定的参考。

(4) 限于目前辐射效益评估手段以及资料的局限性,本研究对黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益的评估是不完全保守估计,仅仅评估了该区生态系统防风固沙的直接效益。实际上,由于生态系统的服务功能减少了区域外其它地区的沙尘侵害,可以很好的促进这些享受生态系统服务功能辐射效益的区域经济社会的持续发展,并由此带来更为广泛和深刻的效益。如这些地区因沙尘入侵的减少,群众呼吸道等疾病可以大幅减少,农业生产可以避免损失,交通可以免受影响,良好的空气质量也可以得到很好的维持,经济社会发展的竞争力也会有所提升,这些都是辐射效益在区域经济社会方面所能产生的间接效益。如何系统全面客观的评估生态系统服务功能的辐射效益,有待今后进一步探讨。

(5) 生态系统服务功能管理对于人类生存至关重要<sup>[43]</sup>,而在不同尺度上,生态系统体现出来的服务功能有所侧重<sup>[33]</sup>。因此,在进行一个区域生态系统管理的时候,应该统筹考虑区域内与区域外生态系统服务功能的价值。生态系统服务功能辐射效益评估的最终目的就是为区域生态系统的协调管理提供决策依据。但是,即便是已经开展了近 30a 的生态系统服务功能价值评估研究,目前由于对生态系统大部分服务功能缺乏深入的生态学理解,能够为决策提供依据的生态学信息仍然非常少<sup>[33]</sup>,因此今后生态系统服务功能的辐射效益的研究任重而道远,需要以区域生态系统协调管理的需求为目标,探讨辐射效益的生态学机制。

致谢:本文在撰写和修改过程中,得到中国科学院生态环境研究中心李锋博士的帮助,特此致谢。

References:

[ 1 ] Li W H. The study of ecosystem services is the core of ecosystem valuation. Resources Science,2006,28(4):3.  
[ 2 ] Westman W E. How much are nature's services worth?. Science, 1977,197:960-964.  
[ 3 ] Costanza R, d Arge R, de-groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin R. G, Sutton P, van

- den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [4] Pimental D, Wilson C, McCulum A. Economic and Environmental benefits of biodiversity. *Bioscience*, 1997, 47(11): 747-757.
- [5] Sutton P C, Constanza R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery, land cover, and ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 2002, 41: 509-527.
- [6] Millennium Ecosystem Assessment Board. *Millennium Ecosystem Assessment: Frameworks*. Washington D C: Word Resources Institute, 2005.
- [7] Gren I M, Groth K H, Sylvén M. Economic values of Danube Floodplains. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45: 333-345.
- [8] Dixon J. Analysis and management of watersheds//Dasgupta P, Goran-Mäter K eds. *The Environment and Emerging Development Issues*. Oxford: Clarendrom Press, 1997.
- [9] Pauutanayak S K. Valuing watershed services: concepts and empirics from Southeast Asia. *Agriculture Ecosystem & Environment*, 2004, 104: 171-184.
- [10] Hanley N, Ruffell R J. The contingent valuation of forest characteristics: two experiments. *Journal of Agricultural Economics*, 1993, 44: 218-229.
- [11] Turner R, van den Bergh J, Söderqvist T, Barendregt A, Straaten J, Maltby E, Ierland E. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy. *Ecological Economics*, 2000, 35: 7-23.
- [12] Loomis J, Kent P, Strange L, Fausch K, Covich A. Measuring the total economic value of restoring ecosystem services in an impaired river basin: result from a contingent valuation survey. *Ecological Economics*, 2000, 33: 103-117.
- [13] Lal P. Economic valuation of mangroves and decision-making in the Pacific. *Ocean & Coastal Management*, 2003, 46: 823-846.
- [14] Zhao J, Yang K. Valuation of ecosystem services: characters, issues and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 346-356.
- [15] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.
- [16] He H, Pan Y Z, Zhu W Q, Liu X L, Zhang Q, Zhu X F. Measurement of terrestrial ecosystem service value in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1122-1127.
- [17] Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, Zheng D, Cheng S Q. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47-53.
- [18] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jiang L Q, Zheng H. Ecosystem services and their valuation of China grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [19] Xu D Y. A valuation study of on the indirect value of forest ecosystems in Chanbaishan Mountain Biosphere Reserve of China. *China Environmental Science*, 2000, 20(2): 141-145.
- [20] Yu X X, Qin Y S, Chen L H, Liu S. The forest ecosystem services and their valuation of Beijing Mountain Areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 783-786.
- [21] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K, Miao H. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480-491.
- [22] Xin K, Xiao D N. Wetland ecosystem service valuation-a case researches on Panjin Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1345-1349.
- [23] Cui L J, Zhao X S. Researches on the energy analysis of Poyanghu wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1480-1485.
- [24] Xie G D, Xiao Y, Zhen L, Lu C X. Study on ecosystem services value of food production in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10-13.
- [25] Yin F, Mao R Z, Fu B J, Liu G H. Farmland ecosystem service and its formation mechanism. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5): 929-934.
- [26] Huang X, Li W H. Study of the function and value of ecosystem of hungriness. *Environmental Science and Management*, 2006, 31(7): 64-70.
- [27] Ren H C, Sun J M, Zhu L H, Meng Q H. Assessment of desert ecosystem service benefits in Western China. *Forest Resources Management*, 2007, 6: 67-69.
- [28] Xu Q, He M C, Yang Z F, Yu J S, Mao X Q. Assessment on urban ecosystem services of Guangzhou city. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2003, 39(2): 268-272.
- [29] Li W K, Li T H, Qian Z H. Impact of land use change on ecosystem service values in Shenzhen. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3): 440-446.
- [30] Li H. Valuation of the ecosystem service functions of Jiangxi Jiulianshan National Natural Reserve. *Economic Geography*, 2006, 4: 70-73.
- [31] Wang Y T, Guo W H, Liu J, Wang S J, Wang Q, Wang R Q. Value of ecosystem services of Kunyu Mountain Natural Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 523-531.
- [32] Guo Z W, Gan Y L. Some scientific questions for ecosystem services. *Biodiversity Science*, 2003, 11(1): 63-69.
- [33] Ouyang Z Y, Zheng H. Ecological mechanisms of ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6183-6188.

- [34] Zhang H F, Ouyang Z Y, Zheng H. Spatial scale characteristics of ecosystem services. *Chinese Journal of Ecology*, 2007,26(9):1432-1437.
- [35] State Environment Protection Bureau. The State Outline of the Important Eco-function Protection Areas Plan. 2007:1-12.
- [36] Xie G D, Xiao Y, Lu C X. Study on ecosystem services: progress, limitation and basic paradigm. *Journal of Plant Ecology*, 2006,30(2):191-199.
- [37] Dong Z B. Establishing statistic model of wind erosion on small watershed basis. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998,18(5):55-62.
- [38] Yue P, Niu S J, Liu X Y. Dust Emission and transmission during spring sand-dust storm in Hunshandake Sand-land. *Journal of Desert Research*, 2008,28(2):227-230.
- [39] Li J F. Desert Climate. Beijing: China Meteorological Press, 2002:28-42.
- [40] Soil Investigation Office in Inner Mongolia. Inner Mongolia Soil. Beijing: Science Press, 1994.
- [41] Li Q, Sun G N, Han Y F. Research on synchronosness of wind break and sand-fixing function of vegetation-in the case of Yulin. *Journal of Shanxi Normal University (natural science edition)*, 2008,36(1):94-98.
- [42] Hai C X, Liu B Y, Zhao Y. Influence of soil humidity and vegetation coverage on wind erosion. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002,13(8):1057-1058.
- [43] Kremen C, Williams N M, Bugg R L, Fay J P, Thorp R W. The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California. *Ecology Letters*, 2004,7:1109-1119.

#### 参考文献:

- [1] 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):3.
- [14] 赵军, 杨凯. 生态系统服务价值评估研究进展. *生态学报*, 2007,27(1):346-356.
- [15] 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.
- [16] 何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 刘旭拢, 张晴, 朱秀芳. 中国陆地生态系统服务价值测量. *应用生态学报*, 2005,16(6):1122-1127.
- [17] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. *自然资源学报*, 2001,16(1):47-53.
- [18] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接经济价值评价. *生态学报*, 2004,24(6):1101-1110.
- [19] 薛达元. 长白山自然保护区生物多样性非使用价值评估. *中国环境科学*, 2000,20(2):141-145.
- [20] 余新晓, 秦永胜, 陈丽华, 刘松. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究. *生态学报*, 2002,22(5):783-786.
- [21] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004,19(4):480-491.
- [22] 辛琨, 肖笃宁. 盘锦地区湿地生态系统服务功能价值估算. *生态学报*, 2002,22(8):1345-1349.
- [23] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态能值分析研究. *生态学报*, 2004,24(7):1480-1485.
- [24] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 鲁春霞. 我国粮食生产的生态服务价值研究. *中国生态农业学报*, 2005,13(3):10-13.
- [25] 尹飞, 毛钊钊, 傅伯杰, 刘国华. 农田生态系统服务功能及其形成机制. *应用生态学报*, 2006,17(5):929-934.
- [26] 黄湘, 李卫红. 荒漠生态系统服务功能及其价值研究. *环境科学与管理*, 2006,31(7):64-70.
- [27] 任鸿昌, 孙景梅, 祝令辉, 孟庆华. 西部地区荒漠生态系统服务功能价值评估. *林业资源管理*, 2007,6:67-69.
- [28] 徐俏, 何梦常, 杨志峰, 鱼京善, 毛显强. 广州市生态服务功能价值评估. *北京师范大学学报*, 2003,39(2):268-272.
- [29] 李文楷, 李天宏, 钱征寒. 深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响. *自然资源学报*, 2008,23(3):440-446.
- [30] 李辉. 江西九连山国家级自然保护区生态系统服务功能价值估算. *林业资源管理*, 2006,4:70-73.
- [31] 王玉涛, 郭卫华, 刘建, 王淑军, 王琦, 王仁卿. 崑崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2009,29(1):523-531.
- [32] 郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题. *生物多样性*, 2003,11(1):63-69.
- [33] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. *生态学报*, 2009,29(11):6183-6188.
- [34] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的空间尺度特征. *生态学杂志*, 2007,26(9):1432-1437.
- [35] 国家环境保护总局. 国家重点生态功能区规划纲要. 2007:1-12.
- [36] 谢高地, 肖玉, 卢春霞. 生态系统服务研究:进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006,30(2):191-199.
- [37] 董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探. *水土保持通报*, 1998,18(5):55-62.
- [38] 岳平, 牛生杰, 刘晓云. 浑善达克沙地春季沙尘暴期间沙尘启动及传输特性研究. *中国沙漠*, 2008,28(2):227-230.
- [39] 李江风. 沙漠气候. 北京:气象出版社, 2002:28-42.
- [40] 内蒙古自治区土壤普查办公室. 内蒙古土壤. 北京:科学出版社, 1994.
- [41] 李琦, 孙根年, 韩亚芬. 植被防风固沙生态功能的时间同步性研究——以榆林市为例. *陕西师范大学学报:自然科学版*, 2008,36(1):94-98.
- [42] 海春兴, 刘宝元, 赵焱. 土壤湿度和植被盖度对土壤风蚀的影响. *应用生态学报*, 2002,13(8):1057-1058.