

基于 HYSPLIT 和 PSCF 的防风固沙生态服务功能空间模拟

苏 凯^{1,2} 王计平¹ 王茵然³ 郭红琼² 李 松² 龙芊芊²

(1. 中国林业科学研究院国家林业和草原局盐碱地研究中心, 北京 100091;
2. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 台湾大学地理环境资源学系, 台北 10617)

摘要: 针对以盐渍化影响和风沙活动为特征的北方农牧交错带,研究其生态系统服务功能空间差异及其流变机制,有助于明确服务提供区(SPA)与服务受益区(SBA)之间的空间关系,制定跨区生态补偿方案。采用混合单粒子拉格朗日积分轨道(HYSPLIT)模型和源贡献潜势(PSCF)模型,模拟了大型盐碱沙尘源地(安固里淖干涸盐碱湖)防风固沙生态系统服务(SSS)对风蚀的影响,确定了在土地覆盖、人口和国内生产总值(GDP)方面的辐射效益,并以辐射效益结果为依据提出跨地区的横向生态补偿方案。结果表明:在2015年,安固里淖干涸盐碱湖生态系统SSS效益显著,固沙量达到367.93万t;研究区SSS传输路径向东部延伸,主要影响我国华北和东北地区,SBA土地面积为189.37万km²,占全国总面积的19.66%,受益范围包括北京市等15个省(市、区),是研究区面积的41167倍;受益人口达5.27亿人,受益GDP总量为28.37万亿元;研究区生态系统提供的SSS使得SBA降尘量减少147.17万t,直接经济效益达44.26亿元;研究区投入生态建设的资金应由北京市等15个受益省(市)共同承担,黑龙江省和内蒙古自治区补偿金额最大,其次为河北省、吉林省和辽宁省等,浙江省需支付的生态补偿金额最少。本研究通过横向生态补偿促进生态建设,以减轻由土壤风蚀造成的损失,可为有关部门的政策决策者提供参考。

关键词: 防风固沙生态服务; 空间模拟; HYSPLIT模型; 生态效益; 生态补偿

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)10-0232-11 OSID: 

Spatial Simulation of Sand-stabilization Ecosystem Service
Based on HYSPLIT and PSCF model

SU Kai^{1,2} WANG Jiping¹ WANG Yinran³ GUO Hongqiong² LI Song² LONG Qianqian²

(1. Research Center of Saline and Alkali Land of State Forestry Administration,
Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China
2. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. Department of Geography, Taiwan University, Taipei 10617, China)

Abstract: For the northern farming-pastoral zone characterized by salinization effects and wind and sand activities, studying the spatial differences in ecosystem service functions and their rheological mechanisms can help to clarify the spatial relationship between service provision area (SPA) and service benefit area (SBA) and cross-regional ecological compensation schemes. The hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory (HYSPLIT) model and the potential source contribution function model (PSCF) were used to simulate the impact of the sand-stabilization ecosystem service (SSS) of the large-scale saline-alkali sand source area (dry saline-alkali lake in Angulinao) ecosystem on wind erosion and SBA. The radiation benefits in terms of land cover, population and gross domestic product (GDP) were determined, and cross-regional horizontal ecological compensation schemes were proposed based on the results of the radiation benefits. The results showed that the SSS of ecosystem in the study area was significant, and the amount of sand fixation reached 3.679 3 million tons; the transmission path of SSS extended to the east, mainly affecting North China and Northeast China. The land area of SBA was 1.893 7 million km², accounting for 19.66% of the total area of China. The benefit scope included 15

收稿日期: 2020-07-01 修回日期: 2020-07-26
基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2017MB038、CAFYBB2017ZA007-3)和科技部科技基础性工作专项(2015FY110500-10)
作者简介: 苏凯(1992—),男,博士生,主要从事3S技术在生态环境中的应用研究,E-mail: sukai_mail@126.com
通信作者: 王计平(1978—),男,副研究员,博士,主要从事森林植被恢复和景观生态系统评价研究,E-mail: wjp_gis@163.com

provinces (cities and districts) such as Beijing, which was 41 167 times of the research area itself; the beneficiary population reached 527 million people, and the total benefited GDP was 28.37 trillion yuan; the ecological restoration of saline-alkali land in the study area reduced the amount of dust in the beneficiary areas by 1 471 700 t, and the direct economic benefit reached 4.426 billion yuan. The ecological compensation fund was jointly undertaken by 15 beneficiary provinces (cities and districts). Heilongjiang Province and Inner Mongolia Autonomous Region had the largest compensation amounts. Followed by Hebei Province, Jilin Province, Liaoning Province and other provinces, Zhejiang Province had to pay the least amount of ecological compensation. Based on the theory of ecosystem service flow, the SSS provision-transmission-benefit mechanism was analyzed, the quantitative relationship between SPA and SBA was studied, and the actual beneficiaries and benefits were determined. Through the application in dry saline-alkali lake in Zhangbei County, Hebei Province, this work can provide policy makers with a reference to promote ecological construction through horizontal ecological compensation and reduce the damage caused by soil wind erosion.

Key words: sand-stabilization ecosystem service; spatial simulation; HYSPLIT model; ecological benefits; ecological compensation

0 引言

风蚀是我国北方干旱半干旱地区农田土壤质量退化和沙漠化的主要过程之一^[1],将导致土地生产潜力衰退,土地沙化使土地的生物生产潜力逐渐衰减消失,产生的沙尘暴严重破坏人类赖以生存的生态环境,直接影响着农业生产和经济建设^[2]。而盐碱尘暴危害比普通沙尘暴更加严重,除了影响能见度、大气质量之外,盐碱粉尘在其下风方形成大片重度污染带,使草场严重退化、耕地粮食减产,加剧了土地荒漠化的趋势;并且对周边环境中的所有裸露部分具有较强甚至很强的腐蚀作用^[3]。

防风固沙生态系统服务 (Sand-stabilization ecosystem service, SSS) 是指位于沙尘源区的生态系统植被具有降低风速、固定土壤的作用,能减少或避免土壤被吹蚀后形成沙尘天气对人类产生有害影响的服务,可以为区域生产生活的可持续发展创造条件^[4]。为了遏制土地荒漠化扩张,减轻由土壤风蚀带来的损失,各级政府采取诸多措施提升 SSS 能力,如退耕(牧)还林(草)、控制放牧强度、禁止开矿等生态工程建设。这些措施从长远来看有利于区域可持续发展,但就当下而言,措施的实施在一定程度上限制了生态建设区社会经济的发展,降低了当地居民的经济收入,并可能增加未来区域的发展机会成本^[5-6]。而处于下风向的周边区域,由于生态建设区环境的改善,遭受土壤风蚀带来的损失越来越小,享受了生态改善的效益却未承担生态建设的投入。尽管中央政府通过重点生态功能区转移支付等政策对承担生态保护功能的区域已进行纵向补偿,但仍不能完全弥补当地发展的机会成本以及经济投入^[7-8]。因此,服务受益区 (Services beneficiary area, SBA) 向服务提供区 (Services providing area,

SPA) 的横向生态补偿 (Ecological compensation scheme, ECS) 将成为必要的补充。

然而,必须明确 SPA 与 SBA 之间生态系统服务 (Ecosystem services, ES) 的提供-传递-利益机制,确定受益范围(补偿主体)和受益效益(补偿金额),才能建立科学、合理的横向生态补偿方案^[9]。目前,对于确定 SBA 空间范围以及 SBA 分享生态服务程度的研究较少,尚处于探索阶段。文献[10]借鉴生态服务半径相关理论,利用地理信息系统技术,通过构建生态辐射模型尝试把生态用地同建设用地联系起来,研究生态用地对建设用地生态效益的辐射范围。文献[11]针对生态系统服务功能的流动特性,探索生态系统服务功能辐射效益的概念与内涵,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固沙生态服务的辐射效益。生态系统服务流动研究通过分析从服务供给区到服务受益区的空间转移过程,确定生态系统服务供给区与受益区的空间范围,在服务供给与人类需求之间建立时空关联。

本文以具有明显空间流动效应的防风固沙生态系统服务作为主要研究对象,通过在河北省张北县农牧交错区的大型盐碱沙尘源地——安固里淖干涸盐碱湖的应用,提出一种合理、公平的跨区域生态补偿方案。对研究区的 SSS 进行量化,基于 ES 流理论,利用 HYSPLIT 模型研究 SSS 从 SPA 向 SBA 的空间传输过程,采用 PSCF 模型确定 SSS 的受益区域和受益效益,根据“谁受益谁补偿”的原则提出基于生态系统服务受益效益的差异化 ECS。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安固里淖 (41° 18' ~ 41° 24' N, 114° 20' ~

114°27'E) 位于河北省张北县西北约 30 km 处(图 1),北接内蒙古高原,南临华北平原,地处农牧交错带。该区气候属于中温带大陆性半干旱季风气候,年降水量为 401.6 mm,降水集中在 6~8 月,年蒸发量为 1 500~2 000 mm。2004 年湖泊彻底干涸,在地下水蒸发作用下将盐分携带至地表并形成表聚,盐碱化加剧。该区年均风速为 4.3 m/s,1~5 月盛行西北风,3~5 月间最大风速可达 28 m/s,典型气候使得安固里淖干涸盐碱湖成为春季影响京津地区的盐尘暴频发地^[7]。为降低土壤盐碱化对当地生产、生活造成的损失,减少土壤风蚀,减轻沙尘天气对京津等下风向区域产生的影响,张北县在研究区开展了多年的生态修复工程。

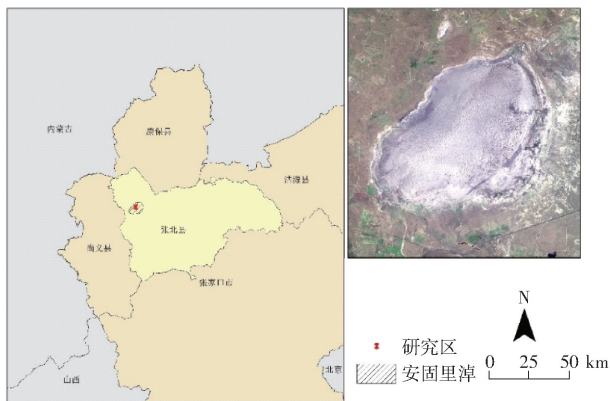


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

1.2 数据源

- (1)气象栅格数据:计算后向轨迹所用的 NCEP 再分析资料是从 NOAA ARL (ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/) 获取的 2015 年 4 月每日 6 h 分辨率的 GBL 资料,空间水平分辨率为 2.5°×2.5°。
- (2)2015 年 1 km 土地覆被数据、2015 年 1 km 人口和 GDP 栅格数据以及多年平均降雨、气温、风速等月均气象站点数据来自资源环境数据云平台 (http://www.resdc.cn/),其中气象栅格数据由对气象站点数据进行空间插值得到。
- (3)土壤属性数据集(包括土种类型,土壤粗砂、细砂、粘粒含量,土壤容重,土壤 N、P、K 及有机质含量等理化性质)、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 (http://westdc.westgis.ac.cn/)。
- (4)90 m 数字高程模型 (DEM) 来自地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)。

1.3 研究方法

1.3.1 防风固沙生态服务估算

生态系统的 SSS 以植被的固沙量作为评价指

标。假设没有植被的条件下产生的风蚀总量(潜在风蚀量)减去在实际植被保护条件下的风蚀总量(实际风蚀量),二者差值即为生态系统植被的固沙量^[12-13]。本研究选取修正风蚀模型(RWEQ 模型)作为风蚀量 S_L 的计算工具估算安固里淖干涸盐碱湖生态系统潜在风蚀量 S_{L1} 和实际风蚀量 S_{L2} ,以两者之差 G 表征安固里淖干涸盐碱湖生态系统 SSS 的固沙量。

$$Q_{\max 1}=109.8 W_F E_F S_{CF} K'$$
 (1)

$$S_1=150.71\left(W_F E_F S_{CF} K'\right)^{-0.3711}$$
 (2)

$$S_{L1}=Q_{\max 1}\left[1-e^{\left(\frac{x}{S_1}\right)^2}\right]$$
 (3)

$$Q_{\max 2}=109.8 W_F E_F S_{CF} K' C_{OG}$$
 (4)

$$S_2=150.71\left(W_F E_F S_{CF} K' C_{OG}\right)^{-0.3711}$$
 (5)

$$S_{L2}=Q_{\max 2}\left[1-e^{\left(\frac{x}{S_2}\right)^2}\right]$$
 (6)

$$G=S_{L1}-S_{L2}$$
 (7)

式中 $Q_{\max 1}、Q_{\max 2}$ ——潜在土壤侵蚀和实际土壤侵蚀的最大运移能力,kg/m
 $S_1、S_2$ ——潜在土壤侵蚀和实际土壤侵蚀的临界场长,m
 x ——下风向最大风蚀出现距离,m
 W_F ——气象因子
 E_F ——土壤可蚀性因子
 S_{CF} ——土壤结皮因子
 K' ——地表糙度因子
 C_{OG} ——植被覆盖因子
 G ——防风固沙量

1.3.2 防风固沙生态服务路径模拟

为了确定 SSS 的效益,需假设在没有 SSS 的情况下,哪些区域(即潜在影响区域)将受到有害物质(沙尘)的影响;在有这种生态系统服务的情况下,哪些地区(即实际受影响的地区)受到沙尘的影响^[14]。潜在影响区域和实际影响区域之间的差异就是受益影响区域。

防风固沙生态系统服务流(Sand-stabilization ecosystem service flow, SSSF)是一种从 SPA 到 SBA 的生态系统服务流。由于 SSSF 与沙尘传输轨迹一致,本研究采用 HYSPLIT 模型来模拟沙尘传输的路径。HYSPLIT 是由美国国家海洋与大气局大气资源实验室(NOAA Air Resources Laboratory, NOAA ARL,https://www.arl.noaa.gov/)研发的一种用于计算简单的空气包裹轨道,以及复杂的传输、扩散、化学转化和沉积模拟的模型,是应用最广泛的大气传输和扩散模型之一^[15]。常用来模拟跟踪和预测放射性物质、野火烟雾、各种固定和移动排放源的污染物、过敏源和火山灰的释放。

HYSPLIT 模型计算气团轨迹使用了拉格朗日法:假设空气中的粒子随风飘动,粒子的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分。粒子或气团的运动轨迹是由初始位置 $p(t)$ 和第 1 个推测位置 $p'(t + \Delta t)$ 的三维速度矢量的平均值计算出来的,其中速度矢量在空间和时间上进行线性插值^[12]。第 1 个推测位置为

$$p'(t + \Delta t) = p(t) + V(p,t)\Delta t \tag{8}$$

最终的位置由初始位置和第 1 个推测位置的平均速率计算得到,即

$$p(t + \Delta t) = p(t) + 0.5(V(p,t) + V(p',t + \Delta t))\Delta t \tag{9}$$

式中 $V(p,t)$ ——初始位置速度向量

t ——初始时刻

Δt ——积分时间步长

$V(p',t + \Delta t)$ ——第 1 个推测位置速度向量

积分时间步长 Δt 在模拟过程中是可变的,但时间步长与最大传输速度 $V_{\max}$ 的乘积应小于数据栅格单元 L_g ,即

$$\Delta t V_{\max} < L_g \tag{10}$$

本研究将研究区中心点看作 HYSPLIT 模型模拟的起始点,利用 NOAA ARL 提供的 GBL 资料,模拟研究区风速在高于起沙风速时的气团 5 d(120 h)后向轨迹。

1.3.3 防风固沙服务受益区识别

本研究中,采用源贡献潜势模型(PSCF)确定 SSS 的 SBA 和受益效益,利用 SSSF 路径以及土地覆被数据来获得^[16]。具体方法为:首先通过模型模拟 SSSF 路径,然后统计覆盖该区域的每个网格单元内的轨迹数,计算通过每个网格单元的轨迹数与分析的轨迹总数的比值获得风沙轨迹分布频率图。该图所覆盖的范围即为 SBA。PSCF 计算方法为

$$P_i = \frac{L_i}{L} \times 100\% \tag{11}$$

式中 P_i ——第 i 个栅格模拟风沙轨迹分布频率, %

L_i ——经过第 i 个栅格模拟风沙轨迹数

L ——起始点的模拟风沙总轨迹数

每个栅格内数值为经过该栅格的模拟风沙轨迹分布频率,即研究区 SSSF 路径分布频率。该频率代表了受益区内获得 SSS 的相对大小,值越高表明该栅格内获得的 SSS 效益越大。

1.3.4 防风固沙服务辐射效益评估

防风固沙服务辐射效益采用减少降尘效益 B 来评估,其计算式为

$$B = Gd_{<0.02}P_s \tag{12}$$

式中 $d_{<0.02}$ ——粒径小于 0.02 mm 的颗粒物含量
 P_s ——降尘清理成本,取一般性粉尘排污费收费标准 1 500 元/t

本研究参照文献[11]研究成果,采用粒径在 0 ~ 0.02 mm 和粒径在 0.002 ~ 0.02 mm 的颗粒物含量进行降尘量的估算。

此外,在估测的受益范围内,筛选森林、草地、农田、聚落以及湿地、内陆水体、近海湿地和河湖滩地等土地覆被类型作为研究区固沙服务受益区,并基于 1 km 人口和 GDP 栅格数据,识别受益区内受益人口与 GDP 分布^[17-18]。

1.3.5 生态补偿

政策制定者希望更多地了解受益于生态系统服务地区的空间范围以及受益地区之间共享生态系统服务的水平^[19]。SBA 应根据其效益水平向 SPA 提供财政补偿,以制定一个可量化的 ECS^[20-23]。本研究中通过减少的降尘量、风沙影响频率和 GDP 来量化生态补偿金额。

$$C_i = B_c p_i \tag{13}$$

式中 C_i ——SBA 应承担的生态补偿费用

B_c ——安固里淖生态修复投入资金(5 000 万元)

p_i ——第 i 个 SBA 受益量占总受益量的比例

2 结果与分析

2.1 防风固沙生态服务实际与潜在量变情景化差异

本研究采用 RWEQ 模型进行了安固里淖 2015 年潜在风蚀和实际风蚀的计算,结果表明,在 2015 年,安固里淖实际风蚀量为 14.349 1 万 t,在假设没有植被保护的情景下潜在风蚀量为 382.279 万 t,实际风蚀量是潜在风蚀量的 3.66%,通过生态修复,减少了 367.93 万 t 的盐碱土壤风蚀。可见,SSS 在减少盐碱土壤风蚀中发挥了重要作用。

多年来,张北县安固里淖干涸盐碱湖一直被认为是影响京津冀地区的重要盐碱沙尘来源。张仁健等^[24]和张兴赢等^[25]通过分析沙尘和土壤成分得出,安固里淖表土为京津冀盐碱沙尘暴的重要源地。这些研究也印证了本研究中 SSSF 路径及其受益范围。安固里淖仍然有沙尘暴发生,并对其春季下风向的广大区域造成影响,但安固里淖如果没有植被覆盖或相关的盐碱地修复措施,其产生的盐碱沙尘暴将更为严重。

2.2 防风固沙生态服务流动路径及受益范围

研究结果显示(图 2、3,表 1),受益于安固里淖生态系统的土地面积为 189.37 万 km²,占全国土地面积的 19.66%。受益范围主要包括北京市、天津市、河北省、山东省、辽宁省、吉林省全境以及内蒙古

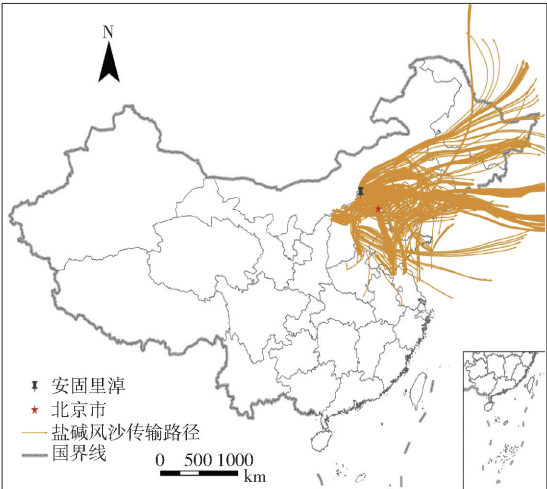


图2 安固里淖生态系统固沙生态服务传输路径
Fig.2 Paths of sand-stabilization ecosystem service at Anguliniao in 2015

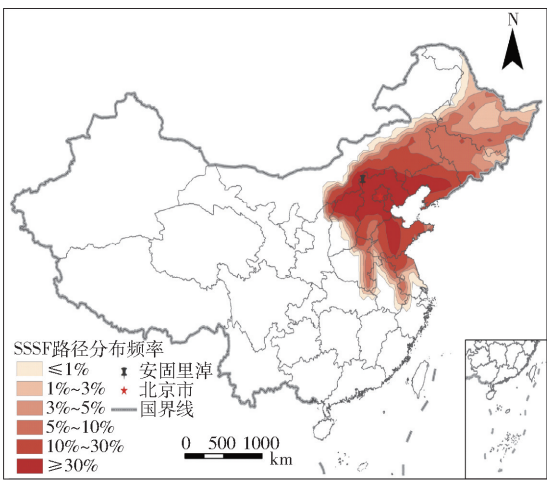


图3 安固里淖生态系统固沙生态服务受益范围
Fig.3 Areas in China benefit from sand-stabilization ecosystem service at Anguliniao in 2015

自治区、山西省、陕西省、河南省、安徽省等部分地区。

SSSF 路径分布频率表示了受益区获得研究区 SSS 效益的相对大小。研究结果显示,河北省、北京

表 1 安固里淖生态系统固沙生态服务受益地区

Tab.1 Areas in China benefit from sand-stabilization ecosystem service at Anguliniao in 2015

地区	受益地区面积/万 km ²						合计	占本省比例/%
	SSSF 路径	SSSF 路径	SSSF 路径	SSSF 路径	SSSF 路径	SSSF 路径		
	分布频率	分布频率	分布频率	分布频率	分布频率	分布频率大于		
	小于等于 1%	1% ~ 3%	3% ~ 5%	5% ~ 10%	10% ~ 30%	等于 30%		
安徽省	2.39	2.56	1.80	1.07	0.38		8.20	58.56
北京市						1.64	1.64	100
河北省			0.01	1.31	3.12	14.33	18.77	100
河南省	1.08	2.23	1.95	2.87	0.65		8.79	52.63
黑龙江省	4.75	11.98	12.48	9.64	0.09		38.94	82.34
湖北省	0.87	0.39					0.63	6.80
吉林省	0.35	1.53	2.47	12.97	1.77		19.10	100
江苏省	1.67	1.63	1.24	1.81	2.52		8.88	82.87
辽宁省				1.12	7.36	6.10	14.59	100
内蒙古自治区	5.02	4.20	2.61	9.83	12.80	4.35	38.82	32.81
山东省		0.24	0.75	2.14	8.11	4.39	15.63	100
山西省	1.29	0.98	0.62	1.02	1.73	5.38	11.03	70.38
陕西省	0.17	0.27	0.17	0.31	0.41	0.25	1.58	7.67
天津市						1.17	1.17	100
浙江省	0.73	0.21					0.94	0.94

市、天津市和山东省中部、山西省北部以及辽宁省 SSSF 路径分布频率更高(≥30%),其获得的研究区 SSS 效益更多。其他远离研究区的区域,受益效益随距离的增加而较小。如:受益区最南端的浙江省获得的研究区 SSS 效益较少,受益面积仅占全省面积的 0.94%。

2.3 防风固沙生态服务辐射效益

在 SBA 内的土地覆被中(图 4a 和表 2):耕地所占面积比例最高,为 43.24%,以旱地和水浇地为主,主要位于华北平原、东北平原等区域;第 2

为林地,面积为 45.65 万 km²,占受益地区面积的 24.11%,以落叶阔叶林和常绿针叶林为主,主要分布在大小兴安岭、长白山、燕山等山脉;第 3 为草地,面积比例为 9.03%,分布在内蒙古自治区东部地区;第 4~6 分别是建设用地、水体和裸地,在所有土地覆被类型中其他用地所占面积比例最低,仅为 0.5%。其中,受益区内获得较多 SSS(SSSF 路径分布频率大于等于 30%)的土地覆被面积为 37.61 万 km²,占受益土地覆被的 19.86%,主要分布在北京市、天津市和山东省中部以及辽宁省的中西部地区。

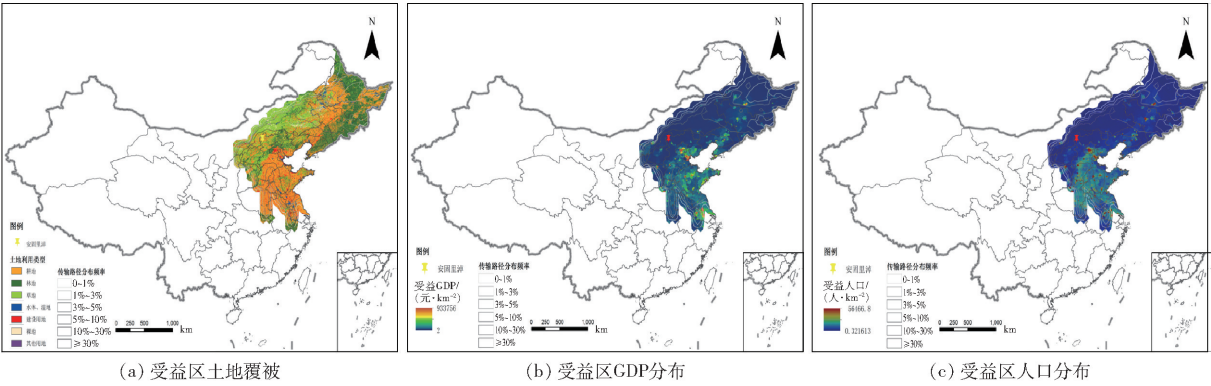


图 4 安固里淖生态系统固沙生态服务受益区土地覆被、人口以及 GDP 分布

Fig.4 Distributions of land cover, population and GDP in China benefit from sand-stabilization ecosystem service at Anguiliao in 2015

表 2 安固里淖生态系统固沙生态服务受益区土地覆被面积

SSSF 路径分布频率/%	耕地	林地	草地	水体	建设用地	裸地	其他用地	合计
0 ~ 1	6. 93	4. 92	4. 34	0. 99	0. 87	0. 23	0. 02	18. 32
1 ~ 3	10. 34	8. 55	4. 09	1. 79	1. 14	0. 24	0. 06	26. 24
3 ~ 5	10. 77	7. 25	2. 87	1. 59	1. 28	0. 32	0. 03	24. 11
5 ~ 10	20. 67	9. 43	7. 19	2. 28	2. 77	1. 73	0. 03	44. 12
10 ~ 30	16. 68	7. 02	9. 27	1. 38	3. 14	1. 37	0. 75	38. 97
≥30	16. 49	8. 48	8. 27	1. 24	2. 85	0. 21	0. 06	37. 61
合计	81. 88	45. 65	36. 03	9. 27	12. 05	4. 1	0. 95	189. 37

2015 年,SBA 内总人口为 5.27 亿人,约占当年全国总人口 38.34%,受益 GDP 总量为 28.37 万亿元,约占当年全国 GDP 总量的 41.36% (表 3)。其中,受益区内获得较多 SSS (SSSF 路径分布频率大

于等于 30%) 的人口为 1.40 亿人,占总受益人口的 26.57%,占全国人口的 10.2%;GDP 为 8.72 万亿元,占受益 GDP 总量的 30.74%,占全国 GDP 的 12.72%。

表 3 安固里淖生态系统固沙生态服务受益区人口以及 GDP

传输路径分布频率/%	受益区面积/ 万 km ²	占全国陆地面积 比例/%	受益人口/ 亿人	占全国人口 比例/%	受益 GDP/ 万亿元	占全国 GDP 比例/ %
0 ~ 1	18. 32	1. 91	0. 47	3. 39	2. 92	4. 26
1 ~ 3	26. 24	2. 72	0. 52	3. 80	2. 73	3. 98
3 ~ 5	24. 11	2. 50	0. 54	3. 93	2. 32	3. 39
5 ~ 10	44. 12	4. 58	1. 07	7. 79	4. 60	6. 69
10 ~ 30	38. 97	4. 04	1. 27	9. 23	7. 08	10. 32
≥30	37. 61	3. 90	1. 40	10. 20	8. 72	12. 72
合计	189. 37	19. 66	5. 27	38. 34	28. 37	41. 36

受益区受益效益统计结果表明(表 4):安固里淖生态系统 SSS 具有显著效益。盐碱地生态修复使得 2015 年研究区下风向地区降尘量减少 147.17 万 t,平均每平方千米降尘量减少达 0.78 t,单位面积经济效益达 1 165.5 元,除尘费用消减达 44.26 亿元,占张北县 2015 年 GDP(91.35 亿元)的 48.45%。可见,安固里淖生态系统 SSS 在减少沙尘对受益区社会经济影响中发挥了重要作用。在受益地区中,内蒙古自治区和黑龙江省受益效益最大,分别为

4.54/4.55 亿元,其次为河北省、吉林省、辽宁省等,浙江省受益效益最小,仅为 0.11 亿元,占 0.24%。

由于临近安固里淖地区,河北省受益效益较为显著,获得最大 SSS (SSSF 路径分布频率大于等于 30%),受益效益约为 1.68 亿元,占河北省总受益效益的 76.46%;其次是辽宁省,最大受益效益约 0.71 亿元,占该省总受益效益的 41.83%;尽管北京市、天津市全区域流动路径分布频率均在 30% 以上,但由于这两地区的面积较小,使得受益效益较

表 4 安固里淖生态系统固沙生态服务受益区受益效益

Tab.4 Benefit level of areas in China benefit from sand-fixing ecological services at Angulinao in 2015									
地区	受益频率/%	受益面积/万 hm ²	受益量/万 t	受益效益/万元	地区	受益频率/%	受益面积/万 hm ²	受益量/万 t	受益效益/万元
安徽省	0 ~ 1	2.39	1.86	2 795.91	辽宁省	0 ~ 1			
	1 ~ 3	2.56	2.00	2 994.79		1 ~ 3			
	3 ~ 5	1.80	1.40	2 105.71		3 ~ 5			
	5 ~ 10	1.07	0.83	1 251.73		5 ~ 10	1.12	0.87	1 310.22
	10 ~ 30	0.38	0.30	444.54		10 ~ 30	7.36	5.74	8 610.01
	≥30					≥30	6.10	4.76	7 136.01
合计		8.20	6.39	9 592.67	合计		14.58	11.37	17 056.24
北京市	0 ~ 1				内蒙古自治区	0 ~ 1	5.02	3.92	5 872.59
	1 ~ 3					1 ~ 3	4.20	3.28	4 913.32
	3 ~ 5					3 ~ 5	2.61	2.04	3 053.28
	5 ~ 10					5 ~ 10	9.83	7.67	11 499.51
	10 ~ 30					10 ~ 30	12.80	9.98	14 973.93
	≥30	1.64	1.28	1 918.53		≥30	4.35	3.39	5 088.80
合计		1.64	1.28	1 918.53	合计		38.81	23.08	45 401.43
河北省	0 ~ 1				山东省	0 ~ 1			
	1 ~ 3					1 ~ 3	0.24	0.19	280.76
	3 ~ 5	0.01	0.01	11.70		3 ~ 5	0.75	0.58	877.38
	5 ~ 10	1.31	1.02	1 532.49		5 ~ 10	2.14	1.67	2 503.45
	10 ~ 30	3.12	2.43	3 649.89		10 ~ 30	8.11	6.32	9 487.39
	≥30	14.33	11.18	16 763.78		≥30	4.39	3.42	5 135.59
合计		18.77	14.64	21 957.86	合计		15.39	12.00	18 003.81
河南省	0 ~ 1	1.08	0.84	1 263.43	山西省	0 ~ 1	1.29	1.01	1 509.09
	1 ~ 3	2.23	1.74	2 608.74		1 ~ 3	0.98	0.76	1 146.44
	3 ~ 5	1.95	1.52	2 281.18		3 ~ 5	0.62	0.48	725.30
	5 ~ 10	2.87	2.24	3 357.44		5 ~ 10	1.02	0.80	1 193.23
	10 ~ 30	0.65	0.51	760.39		10 ~ 30	1.73	1.35	2 023.82
	≥30					≥30	5.38	4.20	6 293.73
合计		8.78	6.85	10 271.18	合计		11.02	8.59	12 891.62
黑龙江省	0 ~ 1	4.75	3.70	5 556.73	陕西省	0 ~ 1	0.17	0.13	198.87
	1 ~ 3	11.98	9.34	14 014.66		1 ~ 3	0.27	0.21	315.86
	3 ~ 5	12.48	9.73	14 599.58		3 ~ 5	0.17	0.13	198.87
	5 ~ 10	9.64	7.52	11 277.24		5 ~ 10	0.31	0.24	362.65
	10 ~ 30	0.09	0.07	105.29		10 ~ 30	0.41	0.32	479.63
	≥30					≥30	0.25	0.19	292.46
合计		38.94	30.37	45 553.49	合计		1.58	1.23	1 848.34
湖北省	0 ~ 1	0.87	0.68	1 017.76	天津市	0 ~ 1			
	1 ~ 3	0.39	0.30	456.24		1 ~ 3			
	3 ~ 5					3 ~ 5			
	5 ~ 10					5 ~ 10			
	10 ~ 30					10 ~ 30			
	≥30					≥30	1.17	0.91	1 368.71
合计		1.26	0.98	1 474.00	合计		1.17	0.91	1 368.71
吉林省	0 ~ 1	0.35	0.27	409.44	浙江省	0 ~ 1	0.73	0.57	853.98
	1 ~ 3	1.53	1.19	1 789.85		1 ~ 3	0.21	0.16	245.67
	3 ~ 5	2.47	1.93	2 889.50		3 ~ 5			
	5 ~ 10	12.97	10.12	15 172.80		5 ~ 10			
	10 ~ 30	1.77	1.38	2 070.61		10 ~ 30			
	≥30					≥30			
合计		19.09	14.89	22 332.21	合计		0.94	0.73	1 099.65
江苏省	0 ~ 1	1.67	1.30	1 953.63		0 ~ 1			
	1 ~ 3	1.63	1.27	1 906.84		1 ~ 3			
	3 ~ 5	1.24	0.97	1 450.60		3 ~ 5			
	5 ~ 10	1.81	1.41	2 117.41		5 ~ 10			
	10 ~ 30	2.52	1.97	2 947.99		10 ~ 30			
	≥30					≥30			
合计		8.87	6.92	10 376.46					

小。

2.4 防风固沙生态补偿权益分配与标准

根据“谁受益谁补偿”的原则,本研究中安固里淖生态系统的生态补偿资金应由黑龙江省、内蒙古自治区、吉林省、河北省、辽宁省、山东省、山西省、河南省、安徽省、江苏省、北京市、天津市、湖省北、浙江省等 15 个受益省(市)共同承担。2013 年张北县投入 5 000 万元专项经费用于安固里淖盐碱地的生态修复,因此张北县应获得生态补偿金额为 5 000 万元。在本研究制定的 ECS 中(表 5),受益效益最大的黑龙江省和内蒙古自治区补偿金额最大,分别为 1 028.63 万元和 1 026.41 万元。其次为河北省、吉林省、辽宁省等,浙江省需支付的生态补偿金额最少,为 25 万元,占总补偿金额的 5%。

3 讨论

本文以生态系统服务流理论为基础,对 2015 年安固里淖生态系统提供 SSS 的空间范围、效益水平进行了研究,并根据 SBA 中 SSS 的效益水平,提出了一种跨区域的差异化 ECS。利用 RWEQ 模型估算了 2015 年安固里淖生态系统的固沙量,并利用 HYSPLIT 模型模拟了 SSSF 的路径。在此基础上,识别和评估了 SBA 及 SBA 内土地覆被、人口和 GDP 的空间分布。结果表明,2015 年安固里淖生态系统 SBA 土地面积为 189.37 万 km²,占全国土地面积的 19.66%。SBA 主要包括黑龙江省、内蒙古自治区、吉林省、河北省、辽宁省、山东省、山西省、河南省、安徽省、江苏省、北京市、天津市、湖北省、浙江省等 15 个受益省(市),是研究区面积的 41 167 倍;SBA 的土地覆被中耕地达 81.88 万 km²,所占面积比例最高,为 43.24%;SBA 的建设用地达 12.05 万 km²;受益人口达 5.27 亿人,约占当年全国总人口的 38.34%,受益 GDP 总量为 28.37 万亿元,约占当年全国 GDP 总量的 41.36%。其中,SBA 内获得较多 SSS(流动路径分布频率大于等于 30%)的人口为 1.40 亿人,占总受益人口的 26.57%,占全国人口的 10.2%;GDP 为 8.72 万亿元,占受益 GDP 总量的 30.74%,占全国 GDP 的 12.72%;研究区盐碱地生态修复使得下风向地区降尘量减少 147.17 万 t,直接经济效益达 44.26 亿元。可见,安固里淖生态系统 SSS 具有很广泛的辐射区域与辐射效益,SSS 在减少沙尘对受益区社会经济的影响中发挥了重要作用。

张北县政府投入大量资金进行安固里淖生态建设,尽管中央财政提供了一定的生态补偿资金,但不足以弥补当地的经济损失,而横向生态补偿机制是

调整生态环境保护和建设相关各方之间利益关系的一种制度安排。根据 SBA 受益程度制定生态补偿方案,量化受益区应支付的生态补偿金额。根据本研究提出的 ECS,将缓解安固里淖生态建设的资金压力,促进生态建设的可持续发展,使 SBA 继续从安固里淖生态系统中获得更多的 SSS。本文以生态系统服务流理论为基础,提出了 SSS 差异化生态系统的研究方法,可为今后确定 SSS 的受益区和跨区域 ECS 提供参考与借鉴。

然而,本研究还存在一些不足,有待今后做更加深入的研究:

(1)仅考虑了盐碱沙尘发生的条件,即充足的风沙源和持续大风天气,然而在沙尘传输、扩散中大气层结构状态发挥了重要作用。大气层结构状态是否稳定将对沙尘能否到达高层空气,传输至更远范围产生影响。本研究忽略该因素,可能会导致假设的沙尘天气频率和强度过高,影响结果的准确性。将在以后研究中加入对该因素的考虑,更加准确地划定 SBA。

(2)本研究通过遥感目视解析和专家咨询在安固里淖干涸盐碱湖选取 10 个起沙位置,对起沙位置缺乏客观、定量的评价。下一步的研究中,将建立安固里淖干涸盐碱湖起沙位置的评价体系获得较为科学、准确的起沙位置分布,同时考虑将研究区划分为足够多的单元,通过插值获得该单元的风速及其他气象要素数据,模拟每个单元的沙尘移动路径,从而确定整个研究区域 SBA。

(3)本研究中模拟了起沙后 5 d(120 h)内沙尘的传输路径,来确定有害物质(盐碱风沙)的影响范围,进而确定 SBA。然而缺少对模拟的沙尘影响范围的验证,在下一步研究中,将通过结合实际发生沙尘天气的卫星影像,判断出不同时间、风速和大气不稳定状态下风沙天气的实际影响范围,对模拟结果进行校正,获得一个相对准确的研究结果。

4 结论

(1)安固里淖生态系统提供了重要的防风固沙生态系统服务并产生了大量的效益。本文采用 RWEQ 模型对安固里淖生态系统 2015 年的防风固沙量进行了估算,估算结果表明,2015 年实际风蚀量为 14.349 1 万 t,假设在没有植被保护的情况下,潜在风蚀量为 382.279 万 t,实际风蚀量仅为潜在风蚀量的 3.66%,安固里淖生态系统使得盐碱土壤风蚀减少了 367.93 万 t。受益于安固里淖生态系统提供的防风固沙生态系统服务的土地面积为 189.37 万 km²,占全国土地面积的 19.66%,有 15

表 5 2015 年受益地区支付安固里淖生态系统生态补偿费用

Tab. 5 Statistics on payment of ecological supplements to Angulinao area in beneficiary areas in 2015

地区	受益频率/%	受益量/万 t	p_i	C_i /万元	地区	受益频率/%	受益量/万 t	p_i	C_i /万元
安徽省	0 ~ 1	1. 86	0. 01	63. 13	辽宁省	0 ~ 1			
	1 ~ 3	2. 00	0. 01	67. 62		1 ~ 3			
	3 ~ 5	1. 40	0. 01	47. 55		3 ~ 5			
	5 ~ 10	0. 83	0. 01	28. 27		5 ~ 10	0. 87	0. 01	29. 59
	10 ~ 30	0. 30	0. 00	10. 04		10 ~ 30	5. 74	0. 04	194. 46
	≥30					≥30	4. 76	0. 03	161. 20
合计		6. 40	0. 04	216. 61	合计		11. 37	0. 08	385. 25
北京市	0 ~ 1				内蒙古 自治区	0 ~ 1	3. 92	0. 03	132. 69
	1 ~ 3					1 ~ 3	3. 28	0. 02	111. 04
	3 ~ 5					3 ~ 5	2. 04	0. 01	69. 01
	5 ~ 10					5 ~ 10	7. 67	0. 05	259. 98
	10 ~ 30					10 ~ 30	9. 98	0. 07	338. 60
	≥30	1. 28	0. 01	43. 32		≥30	3. 39	0. 02	115. 09
合计		1. 28	0. 01	43. 32	合计		30. 27	0. 21	1026. 41
河北省	0 ~ 1				山东省	0 ~ 1			
	1 ~ 3					1 ~ 3	0. 19	0	6. 35
	3 ~ 5	0. 01	0	0. 26		3 ~ 5	0. 58	0	19. 86
	5 ~ 10	1. 02	0. 01	34. 60		5 ~ 10	1. 67	0. 01	56. 67
	10 ~ 30	2. 43	0. 02	82. 42		10 ~ 30	6. 32	0. 04	214. 79
	≥30	11. 18	0. 08	378. 54		≥30	3. 42	0. 02	116. 29
合计		14. 64	0. 10	495. 83	合计		12. 19	0. 08	413. 95
河南省	0 ~ 1	0. 84	0. 01	28. 53	山西省	0 ~ 1	1. 01	0. 01	34. 18
	1 ~ 3	1. 74	0. 01	58. 91		1 ~ 3	0. 76	0. 01	25. 97
	3 ~ 5	1. 52	0. 01	51. 51		3 ~ 5	0. 48	0	16. 43
	5 ~ 10	2. 24	0. 02	75. 81		5 ~ 10	0. 80	0. 01	27. 04
	10 ~ 30	0. 51	0	17. 17		10 ~ 30	1. 35	0. 01	45. 87
	≥30					≥30	4. 20	0. 03	142. 69
合计		6. 85	0. 05	231. 93	合计		8. 59	0. 06	292. 18
黑龙江省	0 ~ 1	3. 70	0. 03	125. 48	陕西省	0 ~ 1	0. 13	0	4. 51
	1 ~ 3	9. 34	0. 06	316. 46		1 ~ 3	0. 21	0	7. 16
	3 ~ 5	9. 73	0. 07	329. 67		3 ~ 5	0. 13	0	4. 51
	5 ~ 10	7. 52	0. 05	254. 65		5 ~ 10	0. 24	0	8. 23
	10 ~ 30	0. 07	0	2. 38		10 ~ 30	0. 32	0	10. 88
	≥30					≥30	0. 19	0	6. 64
合计		30. 37	0. 21	1028. 63	合计		1. 23	0. 01	41. 94
湖北省	0 ~ 1	0. 68	0	22. 98	天津市	0 ~ 1			
	1 ~ 3	0. 30	0	10. 30		1 ~ 3			
	3 ~ 5					3 ~ 5			
	5 ~ 10					5 ~ 10			
	10 ~ 30					10 ~ 30			
	≥30					≥30	0. 91	0. 01	31. 10
合计		0. 98	0. 01	33. 28	合计		0. 91	0. 01	31. 10
吉林省	0 ~ 1	0. 27	0	9. 25	浙江省	0 ~ 1	0. 57	0	19. 41
	1 ~ 3	1. 19	0. 01	40. 42		1 ~ 3	0. 16	0	5. 59
	3 ~ 5	1. 93	0. 01	65. 25		3 ~ 5			
	5 ~ 10	10. 12	0. 07	342. 61		5 ~ 10			
	10 ~ 30	1. 38	0. 01	46. 76		10 ~ 30			
	≥30					≥30			
合计		14. 89	0. 10	504. 28	合计		0. 73	0	25. 00
江苏省	0 ~ 1	1. 30	0. 01	44. 11		0 ~ 1			
	1 ~ 3	1. 27	0. 01	43. 06		1 ~ 3			
	3 ~ 5	0. 97	0. 01	32. 76		3 ~ 5			
	5 ~ 10	1. 41	0. 01	47. 81		5 ~ 10			
	10 ~ 30	1. 97	0. 01	66. 57		10 ~ 30			
	≥30					≥30			
合计		6. 92	0. 05	234. 31					

个省(市)受益;受益人口达 5.27 亿人,约占当年全国总人口的 38.34%,受益 GDP 总量为 28.37 万亿元,约占当年全国 GDP 总量的 41.36%。研究区生态系统使得下风向地区降尘量减少 147.17 万 t,直接经济效益达 44.26 亿元。

(2)实施横向生态补偿将缓解安固里淖生态建设的资金压力,促进生态建设的可持续发展。根据“谁受益谁补偿”的原则,本研究区生态补偿资金由

黑龙江省、内蒙古自治区、北京市等 15 个受益省(市)共同承担。根据 SBA 受益程度制定生态补偿方案,量化受益区应支付的生态补偿金额。张北县于 2013 年投入 5 000 万元生态修复专项经费,受益效益最大的黑龙江省和内蒙古自治区补偿金额最大,分别为 1 028.63 万元和 1 026.41 万元。河北省、吉林省、辽宁省等次之,浙江省需支付的生态补偿金额最少,为 25 万元,占总补偿金额的 5%。

参 考 文 献

- [1] 陈渭南,董光荣,董治宝.中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J].地球科学进展,1994,9(5):6-12.
CHEN Weinan, DONG Guangrong, DONG Zhibao. Progress and trend of research on soil wind erosion in Northern China[J]. Advances in Earth Science, 1994, 9(5):6-12. (in Chinese)
- [2] MAY J, HOBBS R J, VALENTINE L E. Are offsets effective? An evaluation of recent environmental offsets in Western Australia[J]. Biological Conservation, 2017, 206:249-257.
- [3] 韩同林.京津地区沙尘暴与盐碱尘暴浅析[J].科学(上海),2008,60(1):46-49.
HAN Tonglin. Analysis of sandstorm and salt-alkali duststorm in Beijing-Tianjin area[J]. Science(Shanghai),2008,60(1):46-49. (in Chinese)
- [4] 肖玉,谢高地,甄霖,等.阴山北麓草原生态功能区防风固沙服务受益范围识别[J].自然资源学报,2018,33(10):1742-1754.
XIAO Yu, XIE Gaodi, ZHEN Lin, et al. Identifying the benefit areas of wind erosion prevention in the key ecological function area of grassland at the northern foot of Yinshan mountain[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(10):1742-1754. (in Chinese)
- [5] JIE X, YU X, XIE G, et al. The spatio-temporal disparities of areas benefitting from the wind erosion prevention service[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15(7):1510.
- [6] 李国平,李潇.国家重点生态功能区的生态补偿标准、支付额度与调整目标[J].西安交通大学学报(社会科学版),2017,37(2):1-9.
LI Guoping, LI Xiao. Ecological compensation standard, payment amount and adjustment target in national key ecological function areas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences), 2017,37(2):1-9. (in Chinese)
- [7] 王甲山,刘洋,邹倩.中国水土保持生态补偿机制研究述评[J].生态经济,2017,33(3):165-169.
WANG Jiashan, LIU Yang, ZOU Qian. Review on ecological compensation for soil and water conservation mechanism in China [J]. Ecological Economy, 2017, 33(3):165-169. (in Chinese)
- [8] LIU M, YANG L, MIN Q. Establishment of an eco-compensation fund based on eco-services consumption[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 211(APR.1):306-312.
- [9] SU Kai, SUN Xiaoting, GUO Hongqiong, et al. The establishment of a cross-regional differentiated ecological compensation scheme based on the benefit areas and benefit levels of sand-stabilization ecosystem service [J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2020, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122490>.
- [10] 解宇峰,李德波,马晓明,等.人居生态环境评价中的生态辐射模型研究——以深圳市龙岗区为例[J].中国环境科学,2010,30(2):279-283.
XIE Yufeng, LI Debo, MA Xiaoming, et al. Ecological radiation model research in human settlement ecological environment assessment:a case study of Longgang District of Shenzhen City[J]. China Environmental Science, 2010,30(2):279-283. (in Chinese)
- [11] 韩永伟,拓学森,高吉喜,等.黑河下游重要生态功能区防风固沙功能辐射效益[J].生态学报,2010,30(19):5185-5193.
HAN Yongwei, TUO Xuesen, GAO Jixi, et al. Ecosystem services radiation of significant eco-function area in the lower reaches of Heihe River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(19):5185-5193. (in Chinese)
- [12] 赵望龙,郭中领,王仁德,等.安固里淖干湖区土壤理化因子空间分布特征[J].湿地科学,2016,14(4):553-560.
ZHAO Wanglong, GUO Zhongling, WANG Rende, et al. Spatial distribution of soil physical and chemical factors in the Anguliniao playa[J]. Wetland Science, 2016, 14(4):553-560. (in Chinese)
- [13] 迟文峰,白文科,刘正佳,等.基于RWEQ模型的内蒙古高原土壤风蚀研究[J].生态环境学报,2018,7(6):38-47.
CHI Wenfeng, BAI Wenke, LIU Zhengjia, et al. Wind erosion in Inner Mongolia plateau using the revised wind erosion equation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 7(6):38-47. (in Chinese)
- [14] 江凌,肖焱,欧阳志云,等.基于RWEQ模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25,32.
JIANG Ling, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al. Estimate of the wind erosion modules in Qinghai Province based on RWEQ model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(1):21-25,32. (in Chinese)
- [15] MOROZ B E, BECK H L, BOUVILLE, et al. Predictions of dispersion and deposition of fallout from nuclear testing using the NOAA-HYSPLIT meteorological model[J]. Health Physics, 2010, 99(2):252-269.
- [16] MCGOWAN H, CLARK A. Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit[J]. Atmospheric

- Environment, 2009, 42(29): 6915–6925.
- [17] LING Y I, XIONG L Y, YANG X H. Method of pixelizing GDP data based on the GIS[J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(2): 54–58.
- [18] LIU H, JIANG D, YANG X, et al. Spatialization approach to 1 km grid GDP supported by remote sensing[J]. Geo-information Science, 2005, 7(2): 120–123.
- [19] RUDOLF S De G, ROB A, LEON B, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making[J]. Ecological Complexity, 2010, 7(3): 260–272.
- [20] BROWN M, CLARKSON B, BARTON B, et al. Implementing ecological compensation in New Zealand: stakeholder perspectives and a way forward[J]. Journal Royal Society of New Zealand, 2014, 44(1): 34–47.
- [21] CUPERUS R, BAKERMANS M M G J, HAES H A U D, et al. Ecological compensation in dutch highway planning[J]. Environmental Management, 2001, 27(1): 75–89.
- [22] MEINER E, DEVILLE A S, GRÉMILLE T, et al. Combining correlative and mechanistic habitat suitability models to improve ecological compensation[J]. Biological Reviews, 2015, 90(1): 314–329.
- [23] MENG Y, LIU M, GUAN X, et al. Comprehensive evaluation of ecological compensation effect in the Xiaohong River Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(8): 7793–7803.
- [24] 张仁健, 王明星, 浦一芬, 等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 259–266.
- ZHANG Renjian, WANG Mingxing, PU Yifen, et al. Analysis of chemical and physical properties of the super dust storm in Beijing in 2000[J]. Climatic And Environmental Research, 2000, 5(3): 259–266. (in Chinese)
- [25] 张兴赢, 庄国顺, 袁蕙, 等. 北京沙尘暴的干盐湖盐渍土源——单颗粒物分析和 XPS 表面结构分析[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 533–537.
- ZHANG Xingying, ZHUANG Guoshun, YUAN Hui, et al. The dried salt-lakes saline soils sources of the dust storm in Beijing—the individual particles analysis and XPS surface structure analysis[J]. China Environmental Science, 2004, 24(5): 533–537. (in Chinese)

(上接第 212 页)

- [15] 睢晋玲, 刘森, 李春林, 等. 海绵城市规划及景观生态学启示——以盘锦市辽东湾新区为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 975–982.
- SUI Jinling, LIU Miao, LI Chunlin, et al. Sponge city planning and landscape ecology enlightenment: taking Liaodong Bay New Area in Panjin City as an example [J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 975–982. (in Chinese)
- [16] 雷金睿, 陈宗铸, 陈毅青, 等. 1990—2018 年海南岛湿地景观格局演变及其驱动力分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 59–70.
- LEI Jinrui, CHEN Zongzhu, CHEN Yiqing, et al. Analysis on the evolution of wetland land-scape pattern and its driving forces in Hainan Island from 1990 to 2018[J]. Journal of Ecological Environment, 2020, 29(1): 59–70. (in Chinese)
- [17] HU Wenmin, GUO Li, GAO Zhihai, et al. Assessment of the impact of the Poplar Ecological Retreat Project on water conservation in the Dongting Lake wetland region using the InVEST model[J]. Elsevier B. V., 2020, 733: 139423.
- [18] 于强, 杨澜, 岳德鹏, 等. 基于复杂网络分析法的空间生态网络结构研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 214–224.
- YU Qiang, YANG Lan, YUE Depeng, et al. Investigation on complex spatial ecological network structure based on complex network analysis method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 214–224. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180326&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.026. (in Chinese)
- [19] 张启斌. 乌兰布和沙漠东北缘生态网络构建与优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- ZHANG Qibin. Research on the construction and optimization of ecological network in the northeastern edge of Ulan Buh Desert [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019. (in Chinese)
- [20] 杨露, 颜耀文, 宗乐丽, 等. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 568–579.
- YANG Lu, JIE Yaowen, ZONG Leli, et al. Optimal allocation of land use based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model in the Northwest Agro-pastoral Zone[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(3): 568–579. (in Chinese)
- [21] 裴燕如, 武英达, 于强, 等. 荒漠绿洲区潜在生态网络增边优化鲁棒性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 172–179.
- PEI Yanru, WU Yingda, YU Qiang, et al. Robust analysis of potential ecological network edge enhancement in desert oasis area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 172–179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2002019&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.019. (in Chinese)