

DOI: 10.5846/stxb201805111039

迟妍妍, 许开鹏, 王晶晶, 张丽苹. 京津冀地区生态空间识别研究. 生态学报, 2018, 38(23): - .

Chi Y Y, Xu K P, Wang J J, Zhang L P. Identifying regional ecological space in Beijing, Tianjin, and Hebei. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): - .

## 京津冀地区生态空间识别研究

迟妍妍, 许开鹏\*, 王晶晶, 张丽苹

环境保护部环境规划院, 北京 100012

**摘要:**生态空间识别是有效维护生态环境和减缓环境退化的有效方法之一,也是生态学目前研究的重要领域。京津冀地区自然禀赋先天不足,由于持续高强度的开发活动,水资源和土地资源的生态压力增大,脆弱的自然生态本底与经济社会发展的矛盾冲突激烈。为了探索基于可持续发展目标的生态空间管控有效方法,依据生态系统服务功能重要性和敏感性评价,以及重点生态功能区、重要生态功能区和生物多样性保护优先区等生态保护重要区域识别,确定了京津冀地区的生态空间。浑善达克沙漠化防治生态功能区、冀北燕山山区和冀西太行山山区,这些重要的区域关系到京津冀地区水资源和生态安全,是京津冀生态安全的重要屏障。生态空间识别将为京津冀地区社会经济可持续发展提供相应的科学依据。

**关键词:**生态重要性;生态敏感性;生态修复;生态空间;京津冀

## Identifying regional ecological space in Beijing, Tianjin, and Hebei

CHI Yanyan, XU kaipeng\*, WANG Jingjing, ZHANG Liping

Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China

**Abstract:** The identification of ecological space is one of the most efficient ways to effectively maintain the ecological environment and to slow down environmental degradation. It is an important field in ecological research. Given that Beijing and Tianjin cities and Hebei Province are all deficient in natural assets, water and land resources have been under considerable pressure over the last 10 yr. In these areas, there exists an intense conflict between conserving the fragile foundations of the natural ecology and the desire for socioeconomic development. In order to explore the ecological space method and its effectiveness on sustainable development, we evaluated the importance and availability of ecological services and identified key areas of ecological functions and areas of biodiversity that would be considered a conservation priority. The Hunshandake Sandy Land, Hebei Province, an area where desertification prevention is a priority, is bordered by the Yan Mountains to the north and the Taihang Mountains to the west. The area is linked to both the water resources and the ecological security of Beijing, Tianjin, and Hebei, making desertification prevention a matter of concern within these populated regions. This study provides a scientific basis for sustainable socioeconomic development.

**Key Words:** ecological importance; ecological sensitivity; ecological restoration; ecological space; Beijing-Tianjin-Hebei

土地利用规划和生态空间管控应致力于实现经济社会发展和生态环境保护双重目标,任何只注重单一目标的发展都是不可持续的,这是全球千年生态计划的核心思想<sup>[1]</sup>。目前最为通行的方法是对资源与环境进行生态空间识别并划分生态红线,该方法是对稀缺资源和退化环境采取保育或生态修复措施,以便提升该地区生态系统服务功能,达到生态环境保护的目的<sup>[2-3]</sup>。生态空间管控可促使土地管理者修改土地利用规划方

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0503004)

收稿日期:2018-05-11; 修订日期:2018-09-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xukp@caep.org.cn

案、减轻甚至避免生态环境风险问题出现。生态空间识别只有和土地利用规划相互协调,并实现生态系统服务功能提升,才能给人类社会提供资源价值,体现其自身的存在意义<sup>[4]</sup>。Costanza 在 1997 年对全球生态系统服务价值进行了定量评估,在生态系统服务基础上的空间识别已经成为生态学、生态经济学等学科研究的热点和前沿<sup>[5-6]</sup>。一些学者将生态系统服务的概念、内涵和价值评价方法与生态空间识别相结合,探讨生态系统服务与可持续发展研究的关系问题。

生态空间是指用于自然保护、山林保护、生态防护等功能的地域<sup>[7]</sup>。通常来讲,对于生态系统和生物生境保护具有重要作用的地区都可视为生态空间。长期以来,由于人们对生态空间的重要性认识不够,对生态资源总是采取掠夺式的开采或粗放式的管理,这样的结果只能导致生态系统各项服务功能减弱<sup>[8-9]</sup>。随着生态学研究的深入,人们逐渐意识到生态服务功能的重要性,保育和提升生态系统服务功能是实现人类可持续发展的前提之一<sup>[10-11]</sup>。由于对生态系统服务的大部分功能缺乏深入的生态学解释,致使能够为决策者提供依据的生态学信息非常少,这直接影响自然生态系统服务功能的保育和管理,因此,生态空间识别是一种切实解决生态服务功能退化的有效手段之一。

## 1 研究区简介

京津冀地处内蒙高原、太行山脉向华北平原的过渡地带,是华北平原的关键区域,在华北平原生态安全格局中具有重要地位。京津冀北部是华北平原的主要生态屏障,其水源涵养、土壤保持和防风固沙功能直接影响京津冀地区甚至华北平原生态系统安全<sup>[12]</sup>。该区长期以来的资源不合理开发利用造成草原生态系统严重退化,当地土地沙化特别严重、沙漠化敏感性程度极高,该地区是北京市乃至华北地区主要沙尘暴源区。京津冀水资源短缺,全域均出现河流断流和湿地萎缩问题,全年存在断流现象的河流比例约为 70%,永定河、潮白河、小白河、新洋河、滹沱河、民主渠、永金渠等主要河渠存在全年断流现象。同时,随着城市化的快速发展及雄安新区建设,京津冀城镇人口数量激增,带来环境污染加剧、生态承载力降低等一系列生态环境问题<sup>[13-14]</sup>。雄安新区内的白洋淀湿地生态系统稳定性趋向脆弱,湿地洪水调蓄、生物多样性保护等功能退化显著。因此,京津冀区域生态空间识别对维护区域生态安全具有重要意义。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究采用野外调查和遥感影像处理相结合方式进行数据处理。植被覆盖度采用美国国家航空航天局(NASA)数据信息服务中心(DISC)提供 MODIS 数据产品,空间分辨率为 250×250 m。图像处理过程包括大气校正、辐射校正、格式和投影转换等。我们利用最大合成法(MVC)将 16 d 的 NDVI 数据合成为月均值,生成逐月数据集<sup>[15]</sup>。植被覆盖度和 NDVI 之间存在线性关系,通过建立二者之间的转换关系,提取植被覆盖度信息<sup>[16]</sup>。基于像元二分模型设计的遥感估算方法,以 NDVI 值为参数,计算植被覆盖度<sup>[17]</sup>。

### 2.2 生态空间识别方法

针对研究区的水源涵养、土壤保持和土地沙化等主要生态问题,根据《生态保护红线划定技术指南》,在区域生态服务功能重要性评价、生态系统敏感性评价的基础上,参照《全国主体功能区规划》、三省(市)主体功能区规划、《全国生态功能区划(修编版)》、《中国生物多样性保护战略与行动计划》、《中国湿地保护行动计划》等文件中明确的重点关注区域,结合本文研究方法提出生态空间。对于生态空间识别,我们采用生态服务功能重要性和生态敏感性来进行评估,主要包括 5 个方面评估内容。

#### 2.2.1 水源涵养

采用 InVEST 产水量模型,通过径流调节量的大小进行评估。其主要原理是基于 Budyko 曲线和年均降雨量,径流量等于降水量减去蒸散量,公式如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \cdot P_x \quad (1)$$

式中,  $AET_{xj}$  是  $j$  类土地利用类型中像元  $x$  的年实际蒸散量,  $P_x$  为像元  $x$  的年降雨量。  $AET_{xj}/P_x$  是 Budyko 曲线的一个近似值<sup>[18]</sup>。其中径流调节为潜在径流量与实际径流量之差。借助 InVEST 产水量模型, 估算不同植被覆盖程度的流域年度产水量(径流量)及其空间分布特征<sup>[19-20]</sup>。

### 2.2.2 土壤保持

本研究采用通用水土流失方程 USLE 进行评价, 包括自然和人类活动因子, 降雨、坡度坡长、植被、土壤和土地管理等 5 个因素。

$$USEL_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (2)$$

式中,  $USEL_x$  表示栅格  $x$  的土壤侵蚀量;  $R_x$  为降雨侵蚀力;  $K_x$  为土壤可蚀性;  $LS_x$  为坡度-坡长因子;  $C_x$  为植被覆盖因子;  $P_x$  为管理因子<sup>[21-22]</sup>。

### 2.2.3 防风固沙

以生态系统防风固沙服务能力指数作为评估指标, 计算公式为:

$$s_{us} = NPP_{mean} \times K \times Fq \times D \quad (3)$$

$$Fq = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} u^3 \left\{ \frac{ETP_i - P_i}{ETP_i} \right\} \times d$$

$$ETP_i = 0.19 (20 + T_i)^2 \times (1 - ri)$$

$$u_2 = u_1 (z_2 \setminus z_1)^{1.7} \quad D = 1/\cos(q)$$

式中,  $S_{us}$  为防风固沙服务能力指数,  $NPP_{mean}$  为多年植被净初级生产力平均值,  $K$  为土壤蚀性因子,  $Fq$  为多年平均气候侵蚀力,  $u$  为 2 m 高处的月平均风速,  $u_1$ 、 $u_2$  分别表示在  $z_1$ 、 $z_2$  高度处的风速,  $ETP_i$  为月潜在蒸发量 (mm),  $P_i$  为月降水量 (mm),  $d$  为当月天数,  $i$  为月平均气温,  $ri$  为月平均相对湿度 (%),  $D$  为地表粗糙度因子,  $\theta$  为坡度(弧度)。

### 2.2.4 水土流失敏感性

按照土壤侵蚀发生的动力条件分类, 水土流失包括水力侵蚀和风力侵蚀。以风力侵蚀为主带来的水土流失敏感性将在土地沙化敏感性中进行评估, 本节主要对水动力为主的水土流失敏感性进行评估<sup>[23]</sup>。根据通用水土流失方程的基本原理, 通常选取土壤可蚀性、地表植被覆盖、降水侵蚀力、坡度坡长等指标<sup>[24]</sup>。将反映各因子对水土流失敏感性的单因子进行评价, 最后用地理信息系统技术进行乘积运算, 公式如下:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i} \quad (4)$$

式中,  $SS_i$  为  $i$  空间单元水土流失敏感性指数, 评估因子包括降雨侵蚀力 ( $R_i$ )、土壤可蚀性 ( $K_i$ )、坡长坡度 ( $LS_i$ )、地表植被覆盖 ( $C_i$ )。

### 2.2.5 土地沙化敏感性

土地沙化会导致荒漠化的发生, 因此本研究参照《生态功能区划暂行规程》, 选取干燥度指数、起沙风天数、土壤质地、植被覆盖度等指标。本研究利用 GIS 系统的空间分析功能, 先将单个因子的敏感性分布图罗列出, 然后进行乘积运算, 得到研究区的土地荒漠化敏感性等级分布图<sup>[25-26]</sup>, 公式如下:

$$D_i = \sqrt[4]{I_i \times W_i \times K_i \times C_i} \quad (5)$$

式中,  $D_i$  为单元评估区的土地沙化敏感性指数,  $I_i$ 、 $W_i$ 、 $K_i$ 、 $C_i$  分别为评估区域干燥度指数、起沙风天数、土壤质地和植被覆盖的敏感性等级值(表 1)。

## 3 区域生态空间重要性和敏感性评价

### 3.1 区域生态功能重要性评价

重要性评价的目的在于明确研究区各种类型的生态系统服务功能的重要程度, 以及对该区域可持续发展的作用, 并根据重要性进行等级划分, 明确其空间分布<sup>[27-28]</sup>。结合京津冀实际, 我们选用了 3 个指标进行评价。

表 1 土地沙化敏感性评估指标分级

Table 1 Classification of sensitivity assessment of land desertification

指标 Index	干燥度指数 Aridity	$\geq 6$ m/s 起沙风天数 $\geq 6$ m/s Days of sand blowing	土壤质地 Soil texture	植被覆盖度 Vegetation coverage	分级赋值(s) Rating assignment
不敏感 No sensitivity	$\leq 1.5$	$\leq 10$	基岩、粘质	$\geq 0.6$	1
敏感 Sensitivity	1.5—16.0	10—30	砾质、壤质	0.2—0.6	3
极敏感 Extreme sensitivity	$\geq 16.0$	$\geq 30$	沙质	$\leq 0.2$	5

### 3.1.1 水源涵养重要性评价

京津冀地区水源涵养重要性评价结果见图 1, 区域较重要的水源涵养区分别在密云水库上游潮白河流域、官厅水库上游的永定河流域、潘家口水库上游的滦河流域以及西大洋水库、王快水库、黄壁庄水库、岗南水库的汇水区域。

### 3.1.2 土壤保持重要性评价

京津冀地区土壤保持重要性评价结果见图 2, 区域重要的土壤保持区分布在张家口的坝上高原、永定河上游的山间盆地地区、官厅和密云水库上游河谷地区、滦河水系上游山川河谷地区以及保定、石家庄西部太行山山区等地区。

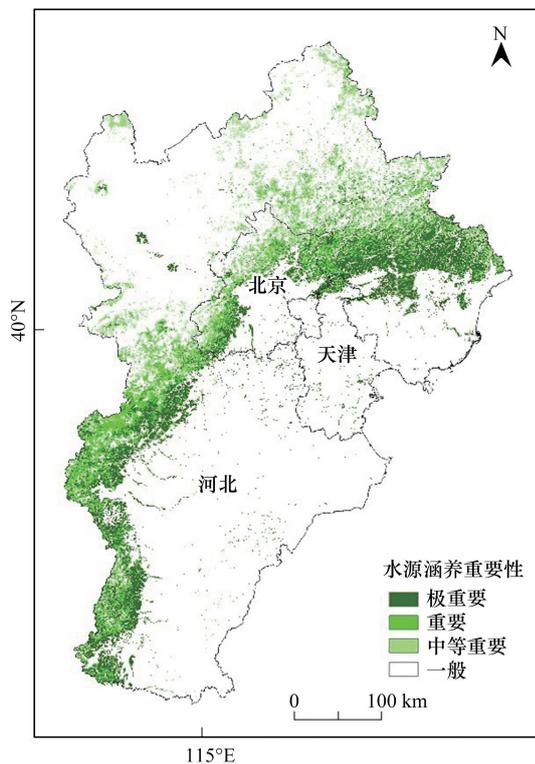


图 1 京津冀地区水源涵养重要性评价

Fig.1 Evaluation of water conservation importance in Beijing-Tianjin-Hebei

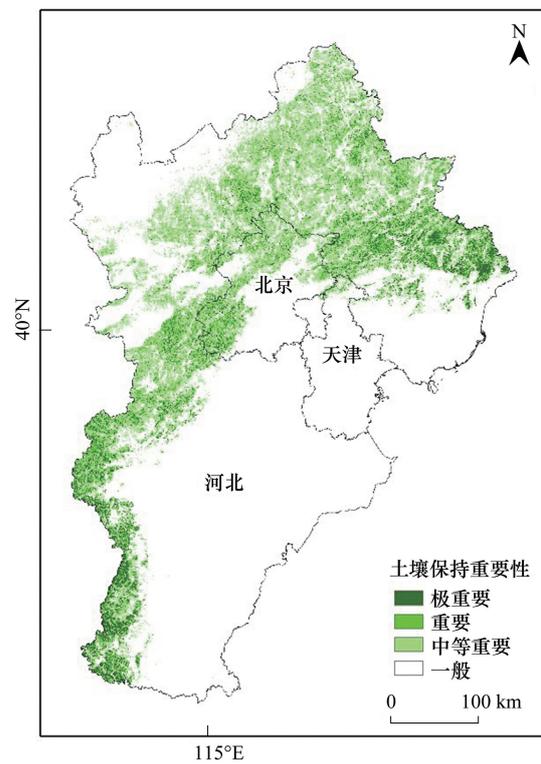


图 2 京津冀地区土壤保持重要性评价

Fig.2 Evaluation of soil conservation importance in Beijing-Tianjin-Hebei

### 3.1.3 防风固沙重要性评价

防风固沙重要性主要反映风沙对大城市等目标的影响程度, 京津冀地区防风固沙重要性评价结果见图 3。北部张承地区为防风固沙重要区域, 东部和南部地区为防风固沙的一般区域。北京毗邻防风固沙重要区域。

### 3.2 区域生态系统敏感性评价

#### 3.2.1 水土流失敏感性评价

京津冀地区水土流失敏感性评价结果见图 4,水土流失极敏感地区分布在中部和西南部地区,而在北部的太行山东坡和燕山山地容易引发生态和贫困的恶性循环,并对北京的饮用水库行洪和供水的造成巨大压力。

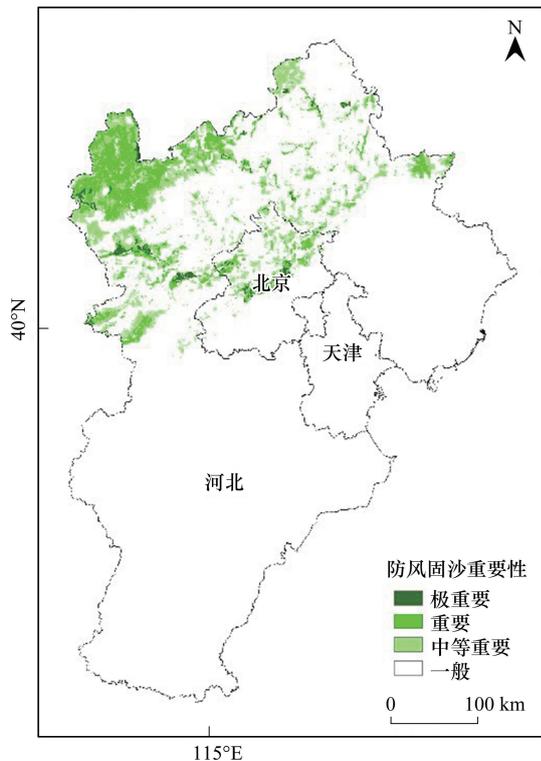


图 3 京津冀地区防风固沙重要性评价

Fig.3 Evaluation of the importance of wind and sand fixation in Beijing-Tianjin-Hebei

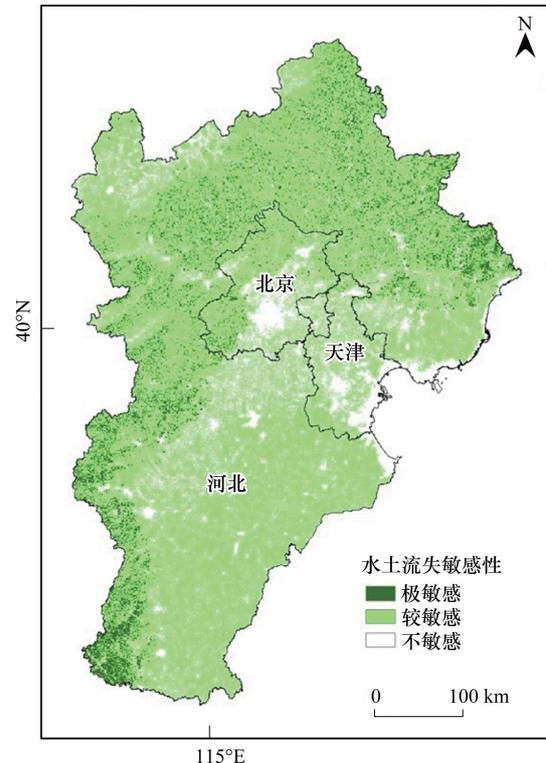


图 4 京津冀地区水土流失敏感性评价

Fig.4 Sensitivity evaluation of soil and water loss in Beijing-Tianjin-Hebei

#### 3.2.2 荒漠化敏感性评价

京津冀地区荒漠化敏感性评价结果见图 5,区域荒漠化敏感性较高,重点地区在河北省北部张承地区,华北平原上较易发生荒漠化的土地为永定河、潮白河下游等干涸河道地区。

## 4 京津冀地区生态空间识别

### 4.1 生态功能极重要区和敏感区

根据区域土壤保持、水源涵养、防风固沙等生态系统服务功能重要性评价,土壤保持功能极重要和重要区分别占区域总面积的 25.2%和 36.9%,主要分布在承德、北京、唐山、秦皇岛和保定等地<sup>[29]</sup>。防风固沙功能极重要和重要区分别占区域总面积的 2%和 2.6%,主要在张家口与承德的坝上地区。水源涵养功能极重要和重要区分别占区域总面积的 51%和 20%,主要分布在承德、张家口、北京、唐山、秦皇岛和保定等地(图 6)。

综合土壤保持、水源涵养、防风固沙等三项生态系统服务功能,京津冀地区生态服务功能“极重要-重要”区域面积约为 6.35 万 km<sup>2</sup>(表 2),面积比例约 30%,主要分布在西部、北部山区<sup>[30]</sup>。

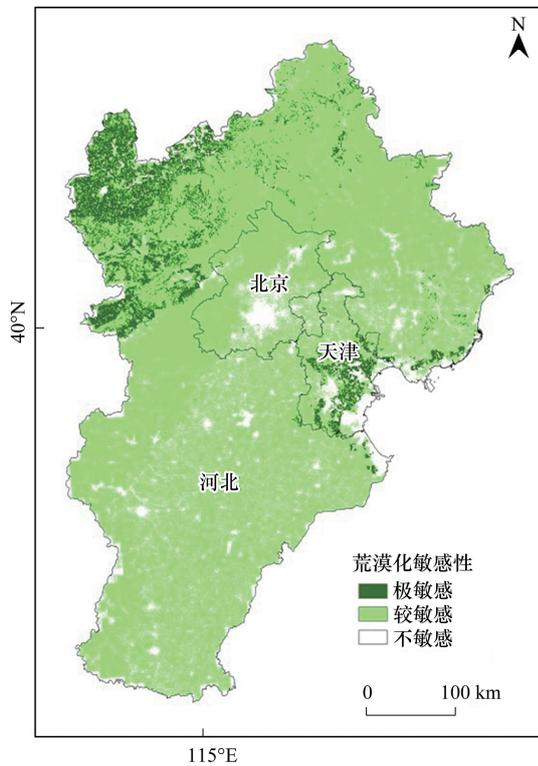


图5 京津冀地区荒漠化敏感性评价

Fig.5 Sensitivity assessment of desertification in Beijing-Tianjin-Hebei

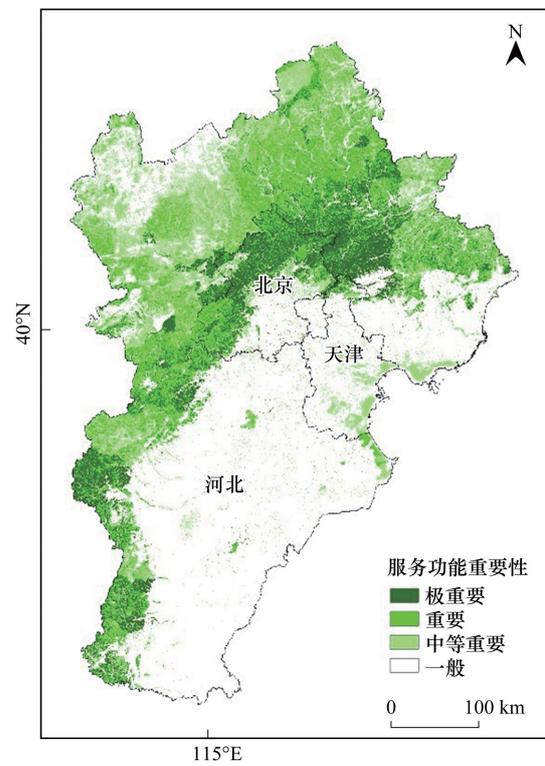


图6 京津冀地区生态服务功能重要性布局

Fig.6 Important ecosystem services in Beijing Tianjin Hebei

表2 京津冀地区生态服务功能评估

Table 2 Assessment of ecological service function in Beijing-Tianjin-Hebei

京津冀 Beijing-Tianjin-Hebei	土壤保持 Soil conservation		防风固沙 Sandstorm prevention		水源涵养 Water conservation	
	亿吨	%	亿吨	%	亿吨	%
极重要 Very Important	0.96	25.13	2.47	1.99	522.69	51.48
重要 Important	1.41	36.91	3.19	2.58	198.56	19.56
中等重要 Medium Important	0.91	23.82	10.72	8.66	150.18	14.79
一般 Common	0.54	14.14	107.47	86.77	143.91	14.17
总量 Total	3.82		123.85		1015.34	

#### 4.2 重点生态功能区

根据《全国主体功能区规划》，京津冀共有 1 处国家重点生态功能区，即浑善达克沙漠化防治生态功能区，河北省的坝上高原风沙防治区位于此区内。根据三省(市)主体功能区规划，共有 2 处省级重点生态功能区，包括冀北燕山山区和冀西太行山山区，总面积 90786 平方公里，关系到京津冀地区水资源和生态安全，是京津冀生态安全的重要屏障(图 7)。

#### 4.3 重要生态功能区

根据《全国生态功能区划(修编版)》，京津冀共有 3 处重要生态功能区，包括京津冀北部水源涵养重要区、太行山区水源涵养与土壤保持重要区以及浑善达克沙地防风固沙重要区<sup>[31]</sup>。京津冀北部水源涵养重要区包括北京市、天津市重要水源地的涵养区及滦河、潮河上游源头，该区的水源涵养对京津冀地区的供水安全具有重要作用。

太行山区水源涵养与水土保持重要区位于河北省、山西省与河南省交界处,太行山是黄土高原与华北平原的分水岭,其水源涵养功能对保障区域生态安全极其重要。浑善达克沙地防风固沙重要区地处阴山北麓东部半干旱农牧交错带,燕山山地、坝上高原,该区是北京市乃至华北地区主要沙尘暴源区。

4.4 生物多样性保护优先区

根据《中国生物多样性保护战略与行动计划》,京津冀共有 2 个生物多样性保护优先区,包括内陆陆地和水域生物多样性保护优先区域中的太行山区、海洋与海岸生物多样性保护优先区域中的黄渤海保护区域(表 3)。

北京市、天津市以及河北省部分地区包含在太行山区内。已建立国家级自然保护区 18 个,国家级水产种质资源保护区 12 个。河北省唐海、黄骅滨海湿地和天津市的汉沽、塘沽、大港盐田湿地包含在黄渤海保护区域内,该区海洋资源丰富,海洋沿岸湿地是鸟类的重要栖息地,也是海洋生物的产卵场、索饵场和越冬场,要加强对该区域内湿地的恢复与保护。

4.5 生态空间划分

本文识别的生态空间包括生态功能极重要区、生态环境极敏感/脆弱区、重点(要)生态功能区、生物多样

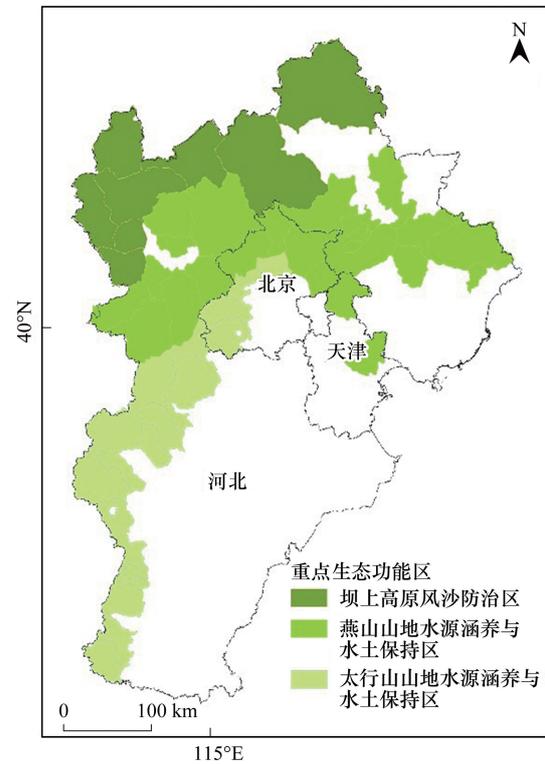


图 7 京津冀地区重点生态功能区分布

Fig.7 Key ecological functional areas in Beijing Tianjin Hebei

表 3 京津冀地区生物多样性保护优先区

Table 3 Priority Areas for Biodiversity Conservation in Beijing-Tianjin- Hebei

类别 Type	名称 Name	范围 Range
内陆陆地和水域生物多样性保护优先区 Priority for inland and water biodiversity	太行山区	北京市、天津市以及河北省部分地区
海洋与海岸生物多样性保护优先区 Priority for marine and coastal biodiversity	黄渤海保护区域	河北省唐海、黄骅滨海湿地和天津市的汉沽、塘沽、大港盐田湿地

表 4 京津冀地区生态空间

Table 4 Ecological Space in Beijing, Tianjin and Hebei

京津冀 Beijing-Tianjin-Hebei	北京		天津		河北		合计 total	
	面积 Area	%	面积 Area	%	面积 Area	%	面积 Area	%
生态功能极重要区 Extremely Important area	5619	34.2	2434	20.4	45145	24.1	53198	24.6
生态环境敏感/脆弱区 Ecological sensitive area	4262	26.0	255	2.1	39056	20.8	43573	20.2
重要生态功能区 Important ecological areas	11259	68.6	3022	25.3	90786	48.4	105067	48.6
生物多样性保护优先区 Biodiversity priorities area	9044	55.1	554	4.6	17290	9.2	26888	12.4
禁止开发区 No development area	3023	18.4	1492	12.4	18488	9.9	23003	10.6
重要湿地地区 Important wetlands areas	145	0.9	228	1.9	555	0.3	928	0.4
合计 Total	11526	70.2	4499	37.8	95721	51.0	111746	51.7

性保护优先区、禁止开发区等。京津冀生态空间面积占区域面积的比例为 51.7%,其中,北京市生态空间占其市域国土面积的比例为 70.2%,天津市生态空间占其市域国土面积的比例为 37.8%、河北省生态空间占其省域国土面积的比例为 51.0%,这些区域是需要严格保护的地区。

## 5 结论与建议

本文采用 GIS 技术,结合京津冀国土空间范围内的资源环境承载能力和开发适宜性评价技术,开展生态功能重要性评价和生态环境敏感性评价,确定水源涵养、水土保持、防风固沙等生态功能极重要区域及极敏感区域,并建议将此地区纳入生态保护红线。本文对京津冀生态空间识别旨在使人们清楚认识到京津冀自然生态系统的重要性和敏感性,生态空间划分不仅有利于生态环境保护,也有助于相关职能部门制定决策时参考,促进经济和生态环境和谐发展。

生态空间识别成为区域生态保护和提升生态系统服务功能的重要措施,还需要开展如下几方面的工作:

以“尊重自然、顺应自然、保护自然”为基本理念,基于从山体到海洋的地理构成,构建京津冀地区生态安全格局、自然岸线格局,划定并严守生态保护红线,构建生态廊道和生物多样性保护网络。重要生态空间面积比例 51%以上。

坚持保护优先、自然恢复为主,实施山水林田湖草系统保护和修复工程,修复湿地、森林、草地等受损的自然生态系统,扭转河湖湿地等水生态系统持续恶化的态势,严格保护自然岸线,全面提升生态系统稳定性和服务功能。

基于山水林田湖草统一保护的理念,将生态建设、开发审批、执法监管、生态修复工程等建立统一的生态监管体制。研发生态环境监测预警、生态修复、生物多样性保护、生态保护红线评估管理、生态廊道构建等关键技术,建立一批生态保护与修复科技示范区。

加强跨界地区生态保护管理一体化。京津冀地区统筹制定空间规划,建立区域一体化的规划和生态保护建设体系,逐步打破行政边界,执行统一的生态环境空间管控和负面清单管理制度。切实落实生态空间管控制度,保障自然资本对经济社会发展的支撑作用,加强生态空间管控力度。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Cao S X, Zhang J Z, Chen L, Zhao T Y. Ecosystem water imbalances created during ecological restoration by afforestation in China, and lessons for other developing countries. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183(Pt 3): 843-849.
- [ 2 ] 迟妍妍, 许开鹏, 王晶晶, 张丽苹. 新型城镇化时期京津冀地区生态环境分区管控框架. *环境保护*, 2015, 42(23): 63-65.
- [ 3 ] 丁雨霖, 冯长春, 王利伟. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究——以重庆市涪陵区义和镇为例. *地理科学进展*, 2016, 35(7): 851-859.
- [ 4 ] 林勇, 樊景凤, 温泉, 刘述锡, 李滨勇. 生态红线划分的理论和技术. *生态学报*, 2016, 36(5): 1244-1252.
- [ 5 ] 尚文绣, 王忠静, 赵钟楠, 邱冰, 郑志磊. 水生态红线框架体系和划定方法研究. *水利学报*, 2016, 47(7): 934-941.
- [ 6 ] 王金南, 许开鹏, 迟妍妍, 王晶晶, 张箫, 陆军, 王夏晖. 我国环境功能评价与区划方案. *生态学报*, 2014, 34(1): 129-135.
- [ 7 ] 王金南, 许开鹏, 蒋洪强, 王晶晶. 基于生态环境资源红线的京津冀生态环境共同体发展路径. *环境保护*, 2015, 43(23): 21-25.
- [ 8 ] 王云才, 吕东, 彭震伟, 高璟. 基于生态网络规划的生态红线划定研究——以安徽省宣城市南漪湖地区为例. *城市规划学刊*, 2015, (3): 28-35.
- [ 9 ] Zhang J Z, Zhao T Y, Jiang C C, Cao S X. Opportunity cost of water allocation to afforestation rather than conservation of natural vegetation in China. *Land Use Policy*, 2016, 50: 67-73.
- [ 10 ] 许开鹏, 步秀芹, 曾广庆, 马蔚纯, 王金南, 包存宽. 环境功能区划的空间尺度特征. *城乡规划*, 2017, (5): 82-89.
- [ 11 ] 许开鹏, 迟妍妍, 陆军, 王金南. 环境功能区划进展与展望. *环境保护*, 2017, 45(1): 53-57.
- [ 12 ] Hao Y, Zhang M H, Zhang Y, Fu C L, Lu Z M. Multi-scale analysis of the energy metabolic processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration. *Ecological Modelling*, 2018, 369: 66-76.
- [ 13 ] Cai B F, Li W X, Dhakal S, Wang J H. Source data supported high resolution carbon emissions inventory for urban areas of the Beijing-Tianjin-Hebei region: spatial patterns, decomposition and policy implications. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 786-799.

- [14] Peng J, Liu Y X, Liu Z C, Yang Y. Mapping spatial non-stationarity of human-natural factors associated with agricultural landscape multifunctionality in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 246: 221-233.
- [15] A D, Zhao W J, Qu X Y, Jing R, Xiong K. Spatio-temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in North China plain in the last 33 years. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 53: 103-117.
- [16] Feng H H, Zou B, Luo J H. Coverage-dependent amplifiers of vegetation change on global water cycle dynamics. *Journal of Hydrology*, 2017, 550: 220-229.
- [17] Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001-2013. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 143-160.
- [18] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. *林业科学*, 2012, 48(10): 1-5.
- [19] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 张大智, 徐燕. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2899-2906.
- [20] 马良, 金陶陶, 文一惠, 吴秀芹, 刘桂环. InVEST 模型研究进展. *生态经济*, 2015, 31(10): 126-131, 179-179.
- [21] 李婷, 刘康, 胡胜, 包玉斌. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [22] 王敏, 阮俊杰, 姚佳, 沙晨燕, 王卿. 基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究——以福建宁德为例. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 184-189.
- [23] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- [24] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 张振明, 吕锡芝, 范敏锐. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 9-13, 19-19.
- [25] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. *生态学报*, 2017, 37(23): 7761-7768.
- [26] 傅伯杰, 陈利顶, 刘国华. 中国生态区划的目的、任务及特点. *生态学报*, 1999, 19(5): 591-595.
- [27] 赵运林, 黄田, 李黎武, 文彤, 曹永卿, 曾敏. 基于 GIS 空间分析的生态服务功能重要性评价——以长株潭城市群生态绿心地区为例. *城市发展研究*, 2010, 17(11): 1-4.
- [28] 徐明华, 冯树丹, 孟祥楠, 倪红伟. 三江平原湿地生态服务功能重要性. *国土与自然资源研究*, 2012, (1): 59-60.
- [29] 欧阳志云. 中国生态功能区划. *中国勘察设计*, 2007, (3): 70-70.
- [30] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 马克明, 李俊然. 中国生态区划方案. *生态学报*, 2001, 21(1): 1-6.
- [31] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 苗鸿, 傅伯杰. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究. *生态学报*, 2001, 21(1): 14-19.