

# 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算

何玲<sup>1\*</sup> 贾启建<sup>2</sup> 李超<sup>3</sup> 许皞<sup>1,4</sup>

(<sup>1</sup>河北农业大学国土资源学院, 河北保定 071000; <sup>2</sup>河北农业大学农村发展学院, 河北保定 071000; <sup>3</sup>中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; <sup>4</sup>河北保定生态文明研究院, 河北保定 071000)

**摘要** 河北省沿海经济的快速发展导致滨海土地利用结构快速转变, 威胁土地生态安全。针对性核算滨海土地生态系统服务价值并测算生态安全底线可为区域生态保护和修复提供依据。本文以河北省东南部黄骅市为研究区, 科学地选择生态安全与粮食安全的结合点、设计结合通道并创建结合方式, 利用生态系统服务价值和粮食安全标准进行生态安全底线测算。结果表明: 2011年, 研究区各地类单位面积生态系统服务价值大小依次为: 湿地>水域>园地>耕地>草地>其他土地>盐田>盐碱地>建设用地; 各单项生态系统服务价值贡献率从大到小依次为: 养分循环>水源涵养>娱乐文化>物质生产>生物多样性维持>气体调节>气候调节>净化环境; 单位面积耕地粮食产量底线为  $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 粮食产值底线为  $0.41 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ , 单位面积土地生态系统服务价值底线为  $21.58 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ , 研究区土地生态服务总价值底线值为42.44亿元; 2081年研究区生态安全达到底线, 以人为主体的生态系统将濒临崩溃。根据生态安全状况, 黄骅市可分为生态核心保护区、生态缓冲区、生态恢复区和人类活动核心区。

**关键词** 土地利用类型; 生态安全底线; 生态系统服务价值; 粮食安全

**Calculation on ecological security baseline based on the ecosystem services value and the food security.** HE Ling<sup>1\*</sup>, JIA Qi-jian<sup>2</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, XU Hao<sup>1,4</sup> (<sup>1</sup>College of Land and Resources, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China; <sup>2</sup>College of Rural Development, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China; <sup>3</sup>College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; <sup>4</sup>Baoding Institute of Ecological Civilization of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China).

**Abstract:** The rapid development of coastal economy in Hebei Province caused rapid transition of coastal land use structure, which has threatened land ecological security. Therefore, calculating ecosystem service value of land use and exploring ecological security baseline can provide the basis for regional ecological protection and rehabilitation. Taking Huanghua, a city in the southeast of Hebei Province, as an example, this study explored the joint point, joint path and joint method between ecological security and food security, and then calculated the ecological security baseline of Huanghua City based on the ecosystem service value and the food safety standard. The results showed that ecosystem service value of per unit area from maximum to minimum were in this order: wetland, water, garden, cultivated land, meadow, other land, salt pans, saline and alkaline land, constructive land. The order of contribution rates of each ecological function value from high to low was nutrient recycling, water conservation, entertainment and culture, material production, biodiversity maintenance, gas regulation, climate regulation and environmental purification. The security baseline of grain production was  $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , the security baseline of grain output value was  $0.41 \text{ yuan} \cdot \text{m}^{-2}$ , the baseline of ecosystem service value was  $21.58 \text{ yuan} \cdot \text{m}^{-2}$ , and the total of ecosys-

本文由国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201311060)和河北省科技支撑计划项目(132276329)资助 This work was supported by the Special Funds on Public Welfare Research by Ministry of Land and Resources (201311060) and the Science and Technology Support Program of Hebei Province (132276329).

2015-05-22 Received, 2015-11-01 Accepted.

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: helingsss@163.com

tem service value in the research area was 4.244 billion yuan. In 2081 the ecological security will reach the bottom line and the ecological system, in which human is the subject, will be on the verge of collapse. According to the ecological security status, Huanghua can be divided into 4 zones, *i.e.*, ecological core protection zone, ecological buffer zone, ecological restoration zone and human activity core zone.

**Key words:** land use type; ecological security baseline; ecosystem service value; food security.

土地是最宝贵的自然资源,随着经济的快速发展,不合理的土地利用现象频繁出现,使得土地生态安全受到威胁.生态安全指人类生活、生产的基本保障和来源以及适应环境变化的能力等不受威胁的状态<sup>[1]</sup>.生态安全关系到人类的生存与发展,目前土地利用中的生态安全问题日渐凸显,且受到国内外众多学者的广泛关注,其研究在地学、生态学、资源科学等领域迅速发展<sup>[2-3]</sup>.当前的生态安全研究多集中于生态安全评价和生态安全格局构建<sup>[4-8]</sup>.前者主要围绕生态足迹与生态承载力方法<sup>[9-11]</sup>和基于“压力-状态-响应”等模型<sup>[12-14]</sup>的评价指标体系研究;后者更多借助最小阻力模型进行安全格局划分<sup>[15-16]</sup>.二者多是对区域现状或不同时期的生态安全变化进行时空分析,根据计算结果划分生态阈值,将计算出的最低值作为生态安全底线<sup>[17]</sup>.其生态安全底线仅代表某研究时段的最低值,不能代表研究区任意时间、任意自然环境、任意生活质量的最低值,即生态系统崩溃值.

本研究试图探索生态系统濒临崩溃的生态安全底线,而非依现状计算的生态阈值中的最低值,这个底线值在没有生态保护措施的若干年后出现,也可能因生态保护措施得当永不出现.本文仅探索没有任何生态改善措施情况下,生态系统崩溃时生态安全底线值及其出现时间.首先,如何界定生态系统濒临崩溃?关于生态系统的主体学者们有不同看法,本研究基于以人为主体的观点,根据人类粮食需求的生存底线推算生态崩溃底线.当土地提供的粮食数量(暂不考虑粮食质量)满足不了人类的基本生活需要,人类解决不了温饱问题,甚至面临由于饥饿导致的死亡,则称为以人为主的生态系统濒临崩溃.其次,如何直观、准确计算生态安全底线?科学地选择生态安全与粮食安全的结合点、设计结合通道并创建结合方式是解决问题的关键.生态安全评价与格局构建都是以生态系统的功能效益为基础,粮食安全标准则基于粮食产量和人均消费量,将两者直接联系最简便也最准确的方法就是价值,因此生态安全与粮食安全的最佳结合点是货币化的价值;不

同地类生态服务功能和效益不同,不同地类粮食等物质生产能力也存在差异,能同时与 2 个安全价值结合的只有地类,所以生态安全与粮食安全的最佳结合通道是地类;2 个安全的最佳结合方式是通过耕地的粮食产出能力,计算耕地物质生产价值,进而计算耕地的生态系统服务价值,通过耕地与其他地类的生态系统服务价值关系间接计算生态系统服务总价值.本研究以河北省黄骅市为研究区,基于 3S (GIS、RS 和 GPS) 技术,利用植被净第一生产力 (NPP) 进行针对性的生态系统服务价值估算,结合粮食安全标准测算生态安全底线,并根据黄骅市历年生态系统服务价值变化规律,找到生态系统服务价值达到生态安全底线的时间年限,通过构建生态安全格局为区域生态保护和修复提供依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄骅(38°09′—38°39′ N, 117°05′—117°49′ E)位于河北省东南部、海河平原黑龙港流域最东端,总面积 2177.83 km<sup>2</sup>,海岸线 65.8 km.黄骅市地貌类型为退海淤积和冲积平原类型,地势低洼平坦,从西南向东北缓缓倾斜,海拔在 1~7 m.该区属暖温带半湿润季风气候,因濒临渤海湾略具海洋性气候特征,有“气候温和、光照充足、降雨集中、四季分明”的特点,年均气温 13 ℃,年蒸发量 1500~2000 mm,年降水量 500~600 mm.黄骅市土类包括潮土、盐土和沼泽土.因受地形、冲积母质和土体构型的影响较大,全市土壤瘠薄,盐碱化程度严重,pH 值在 7.5~8.5;土壤含盐量>0.3%,最高达 3.3%;土壤有机质含量较低,平均为 9.5 g·kg<sup>-1</sup>,肥力偏低.植物种类较少,大部分为草本植物,木本乔木和灌木植物较少.

### 1.2 数据来源及处理

**1.2.1 土地利用类型数据的来源与处理** 数据来自地理空间数据云,空间分辨率均为 30 m,轨道号 122/33, Landsat 7 ETM+ 影像,成像时间 2011 年 6 月 25 日,平均云量为 1.5.影像图云层明显位于图幅中上部,黄骅市位于该图的左下部,左下角云量为

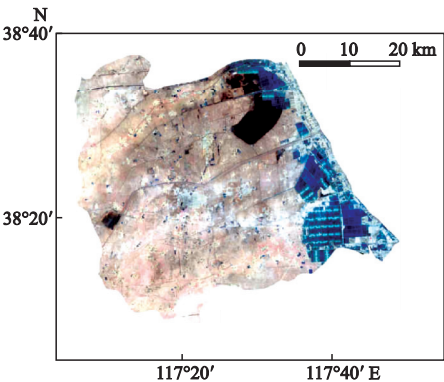


图 1 2011 年黄骅市影像图  
Fig.1 Images of Huanghua City in 2011.

0.78, 基本未被云层遮盖. 为准确获取数据, 在 ENVI 4.7 软件支持下, 对该图幅进行去云处理. 将 2011 年影像依据 1 : 1 万土地利用现状图进行几何校正, 后将影像进行 4、3、2 波段组合, 按照黄骅市行政界线进行图像裁剪, 进行几何精校正, 最后对图像进行增强处理(图 1).

**1.2.2 归一化植被指数的来源与处理** 归一化植被指数 (NDVI) 的数据来自地理空间数据云, 为 MOD13Q1 的 MODIS 数据产品, 时间跨度为 2011 年 1—12 月, 需对原始数据进行裁剪、大气校正、辐射校正、几何校正. MODIS 数据产品为 16 d 合成的 250 m 空间分辨率的植被指数. 为保证与气象数据的时

间分辨率保持一致, 采用最大值合成法 (MVC) 将数据进行合成, 使数据受云的影响最低, 生成研究区逐月 NDVI 数据(图 2).

**1.2.3 气象数据的来源与处理** 由中国气象数据资源共享服务网获得黄骅、泊头、沧州市 3 个站点的气象数据, 并从黄骅市周边 20 个县气象局收集获取各县 2011 年全年的日气象数据. 通过数据汇总计算, 获得黄骅市及周边各县各月的平均降水量、蒸发量、平均温度、风速、太阳辐射量、日照时数、湿度、水汽压、大气压及极端最高、最低气温等气象数据. 通过 ArcGIS 10.0 软件的空间插值功能, 对各月各气象数据分别进行反距离加权空间插值<sup>[18]</sup>, 分别获得分辨率为 30 m×30 m 的 2011 年黄骅市 1—12 月平均降水量、蒸发量、平均温度、风速、太阳辐射量、日照时数、湿度、水汽压、大气压及极端最高、最低气温分布数据.

**1.2.4 外业调研数据的来源与处理**

1) 土壤数据. 在行政区划图、土地利用现状图和土壤类型分布图的综合基础上, 按照各乡镇面积, 平均布设样点, 在地形复杂、利用方式复杂的区域适当多布点, 共布点 303 个(图 3). 2014 年 7 月采集各样点 0~20 cm 土样. 全部土样用土壤农化常规方法测定土壤全氮、全磷、全钾含量及容重. 其中, 土壤全氮含量采用半微量开氏法测定, 土壤全磷含量采用高

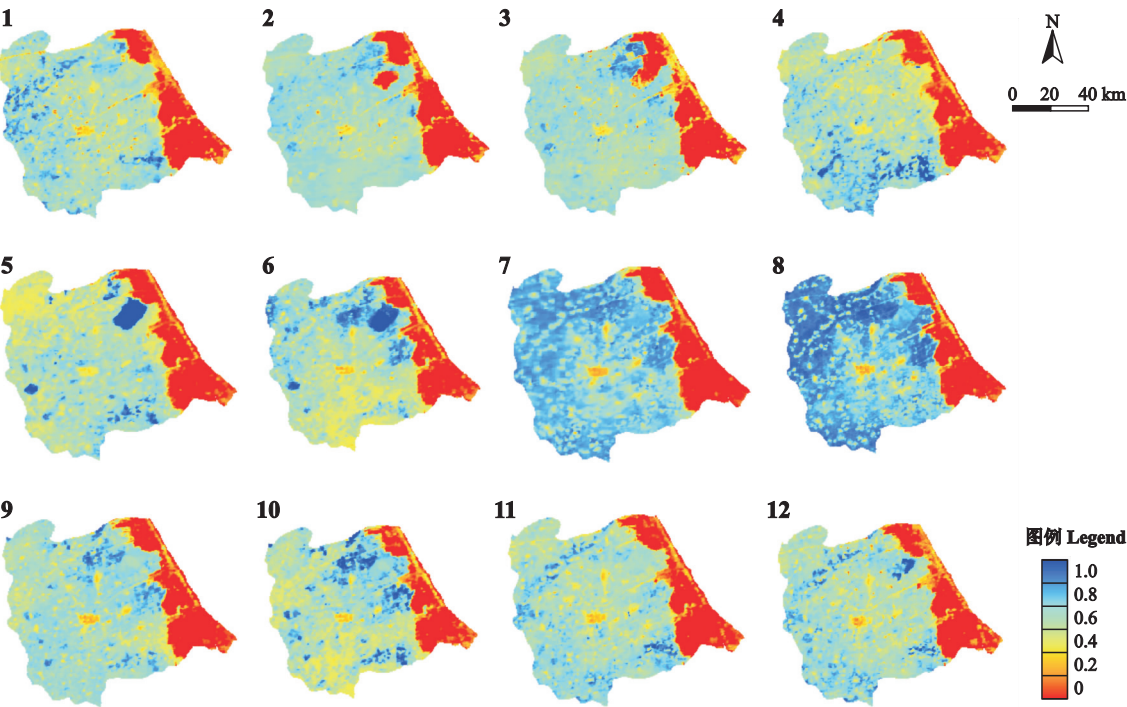


图 2 黄骅市 2011 年 1—12 月 NDVI 空间分布图  
Fig.2 Spatial distribution of NDVI in Huanghua City from January to December in 2011 (30 m×30 m).



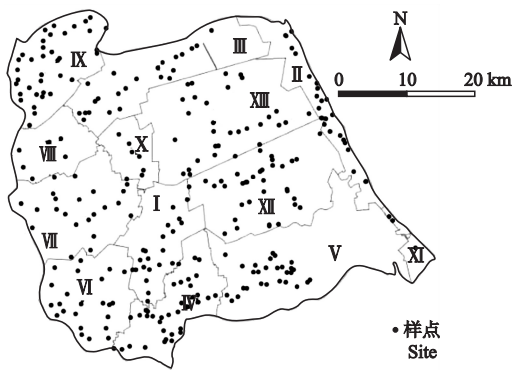


图3 调查样点分布  
Fig.3 Distribution of survey sites.

I: 黄骅镇 Huanghua Town; II: 南排河镇 Nanpaihe Town; III: 吕桥镇 Lyuqiao Town; IV: 旧城镇 Jiucheng Town; V: 羊二庄镇 Yangerzhuang Town; VI: 常郭镇 Changguo Town; VII: 滕庄子乡 Tengzhuangzi Town; VIII: 官庄乡 Guanzhuang Town; IX: 齐家务乡 Qijiawu Town; X: 羊三木乡 Yangsanmu Town; XI: 黄骅港 Huanghua Port; XII: 中捷产业园区 Zhongjie Industry Park; XIII: 南大港产业园区 Nandagang Industry Park.

氯酸-硫酸酸溶法测定,土壤全钾含量采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定,土壤容重采用环刀法测定<sup>[19]</sup>.

2) 物种数目.结合土壤数据调查样点,在研究区内布设 303 个 1 m×1 m 研究小区.考虑到气温、降水对地表植被的影响,选择反映地表植被信息较多的 7 月进行样地调查,对每个小区进行详细的物种辨别、分类及取样.受动物活动场所及时间的限制,调查结果代表现状最低物种数目.

1.2.5 统计数据的来源 价格指数来自中华人民共和国国家统计局网站(<http://www.stats.gov.cn/>),土地数据来自 1996—2008 年河北省国土资源厅统计数据.本研究结合全国土地利用现状分类<sup>[20]</sup>、中国科学院资源环境分类系统、滨海盐碱土区的特征和黄骅市的实际情况,以土地利用方式为基础,以人类社会的景观生态需求为立足点,选取研究区面积较大的地类进行提取,分为耕地、园地、草地、建设用地、水域、盐碱地、湿地、盐田、其他土地 9 类.

1.3 植被净第一生产力的估算方法

植被净第一生产力(NPP)是单位时间、单位面积内植被所积累的有机物质总量,是光合作用产生的有机物和自养呼吸所消耗有机物的差值<sup>[21-22]</sup>.其公式为:

$$NPP=GPP-R$$
 (1)

式中:NPP 为净第一生产力( $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );GPP 为总第一生产力( $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ );R 为呼吸消耗量( $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ).

$$GPP=FPAR \times PAR \times f(T) \times f(\beta) \times \varepsilon_{\max}$$
 (2)

式中:FPAR 为植被吸收的入射光合有效辐射比例;PAR 是太阳入射光合有效辐射; $f(T)$  为温度胁迫系数; $T$  为温度; $f(\beta)$  为水分胁迫系数; $\beta$  为蒸发比; $\varepsilon_{\max}$  为最大光能利用率.

由于需要计算的指标因子较多且计算过程较复杂,为了保证计算精度,各指标的计算借助 ArcGIS 的栅格计算器功能实现,空间数据的输出分辨率均为 30 m×30 m.

1.4 单项生态系统服务价值的估算方法

依据 Costanza 等<sup>[23]</sup>和谢高地等<sup>[24]</sup>的研究成果,结合滨海地区实际情况(为负地形,属构造下沉区,土壤侵蚀作用小),本研究估算除土壤侵蚀功能以外的物质生产功能、养分循环功能、气体调节功能、气候调节功能、水源涵养功能、净化环境功能、生物多样性维持功能和景观文化 8 个类型.

1.4.1 物质生产功能 物质生产功能是绿色植被通过光合作用累积有机质的过程,该功能为人类及其他生物提供最基础的能量.

$$V_{\text{om}} = \sum NPP(x) \times P_{\text{OM}}$$
 (3)

式中: $V_{\text{om}}$  为物质生产价值; $NPP(x)$  为  $x$  像元每年生产的有机物质质量; $P_{\text{OM}}$  是有机物质价格.

1.4.2 养分循环功能 养分循环功能是绿色植被通过光合作用将营养元素转化为有机物质,为其生命提供所需营养物质的过程.

$$V_{\text{nc}} = \sum V_{\text{nc}_i}(x) = \sum NPP(x) \times R_{i1} \times R_{i2} \times P_i$$
 (4)

式中: $V_{\text{nc}}$  为养分循环价值; $V_{\text{nc}_i}(x)$  为  $x$  像元处单位面积上积累的第  $i$  种营养元素价值; $i$  代表 N、P、K 3 种元素; $R_{i1}$  为  $i$  元素在不同生态系统生产的有机物质中的分配率; $R_{i2}$  为  $i$  元素折算成化肥的比例; $P_i$  为  $i$  肥的价格.

1.4.3 气体调节功能 气体调节功能指植物通过光合作用与呼吸作用释放的  $\text{O}_2$  对空气质量调节的贡献.以有机质的生产为基础,根据光合作用与呼吸作用的化学反应方程式可推算出,每生产 1 单位干物质可以释放 1.2 单位的  $\text{O}_2$ <sup>[25]</sup>.根据影子工程法,利用工业制氧的价格来评估释放  $\text{O}_2$  的价值.

$$V_{\text{sfo}} = \sum 1.2 \times NPP(x) \times V_{\text{O}_2}$$
 (5)

式中: $V_{\text{sfo}}$  为气体调节价值; $V_{\text{O}_2}$  为工业制氧单位价格.

1.4.4 气候调节功能 气候调节功能指植物通过光合作用与呼吸作用固定的  $\text{CO}_2$  对气候调节的贡献.每生产 1 单位干物质,需要消耗 1.62 单位的  $\text{CO}_2$ .根

据成本替代法,采用被较多国家和环境经济学家普遍认可的瑞典碳税率的单位价值来替代 CO<sub>2</sub> 的单位价值<sup>[25]</sup>,从而计算出气候调节的价值。

$$V_{xsc} = \sum 1.62 \times NPP(x) \times V_{CO_2}$$

(6)

式中: $V_{xsc}$  为气候调节价值; $V_{CO_2}$  为依据瑞典碳税率所换算出的 CO<sub>2</sub> 单位质量价格。

**1.4.5 水源涵养功能** 水源涵养功能主要指水源对水分的调节与供应。水分调节指下垫面为水域时,生态系统对水域进行调节;水分供应指下垫面为土壤时,生态系统为区域内各类生物提供水分。本文采用替代工程法计算生态系统水源涵养价值。

$$V_{WC} = \sum V(x) \times P_w$$

(7)

式中: $V_{WC}$  为水源涵养价值; $V(x)$  为  $x$  像元处每年单位面积涵养水量; $P_w$  为修建水库单位库容平均成本。

当下垫面是土地时,水源涵养公式如下:

$$V_s(x) = \sum P_{mean}(x) \times K_w \times R_w$$

(8)

式中: $V_s(x)$  是下垫面为土地时  $x$  像元处每年单位面积涵养水源量; $P_{mean}(x)$  为像元  $x$  处逐月降水量; $K_w$  为产流降雨量占总降雨量的比例; $R_w$  为地表植被减少径流系数。

当下垫面是水域时,水源涵养公式如下:

$$V_{WC}(x) = \sum P_{mean}(x) - ET_a(x)$$

(9)

式中: $V_{WC}(x)$  是下垫面为水域时  $x$  像元处每年单位面积涵养水源量; $P_{mean}(x)$  为  $x$  像元处逐月降水量; $ET_a(x)$  为  $x$  像元处逐月实际蒸散量。

**1.4.6 净化环境功能** 净化环境功能主要表现吸收分解有毒物质、吸附尘埃和杀灭细菌等多种功能。本文仅对各生态系统吸收分解 SO<sub>2</sub>、HF、NO<sub>x</sub> 和吸附尘埃的作用进行价值计算。

$$V_{ce} = \sum Q_{ij} \times C_{ij} \times S_i$$

(10)

式中: $V_{ce}$  为净化环境价值; $Q$  为单位面积有害物质吸收的量; $C$  为单位治理成本; $S$  为各生态系统的面积; $i$  为各生态系统; $j$  为吸收不同有害物质。

**1.4.7 生物多样性维持功能** 选用 Shannon 指数计算生物多样性维持功能价值。

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i$$

(11)

式中: $H$  为 Shannon 指数; $P_i$  为属于种  $i$  的个体在全部个体中的比例。

将计算出的生物多样性指数进行空间插值,得出黄骅市生物多样性指数空间分布数据。参照国家林业评估标准《森林生态系统服务功能评估规

表 1 物种保育指数分级价值  
Table 1 Graded values of species conservation index

| 等级<br>Grade | 指数<br>Index | 单价<br>Value in per unit area<br>(yuan · hm <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-------------|--|
| I           | ≥6          | 50000  |
| II          | [5,6)       | 40000  |
| III         | [4,5)       | 30000  |
| IV          | [3,4)       | 20000  |
| V           | [2,3)       | 10000  |
| VI          | [1,2)       | 5000   |
| VII         | <1          | 3000   |

范》<sup>[26]</sup>中的物种保育指数分级价值表(表 1),将生物多样性指数转化为货币价值,进而得出生物多样性价值。

**1.4.8 娱乐文化功能** 娱乐文化功能价值通过研究区旅游收入来体现。黄骅市 2011 年文化旅游总收入 8.69 亿,主要旅游景点有南大港湿地自然保护区、古贝壳堤自然保护区、古贡冬枣园、歧口炮台遗址、世博园游乐园等。各生态类型娱乐文化价值比值为:草地:园地:水域:湿地=1:19:115:727.5;耕地、盐碱地、盐田、建设用地的娱乐文化价值暂不计算。

1.5 生态安全底线值估算方法

**1.5.1 粮食安全底线值的界定** 国家统计局为了保持数据的一致性,将“粮食”界定为稻谷、小麦、玉米和大豆 4 个主要品种。根据黄骅市实际情况,将上述粮食统一归并为耕地的物质产出。虽然耕地的产出物不仅仅是以上 4 种作物,但为了计算方便且不影响准确度,所有耕地产出物按照热量比全部转化为小麦进行计算。

关于人均粮食底线的界定,参照文献[27-32]的研究成果,将人均粮食标准划分为:温饱底线为人均 350 kg 粮食,小康底线为人均 400 kg 粮食,富裕底线为人均 450 kg 粮食,此处的粮食指各种人类摄入的食物全部按热量转化为小麦,各级别粮食产量按自给率 100% 进行计算,以便更精确地探索生态安全底线。

**1.5.2 生态安全底线值的估算** 首先,计算单位面积耕地粮食产量底线。虽然随着科技水平的提升,粮食产量日益提高,但若耕地退化或污染到一定程度,必定会导致粮食产量下降,此步骤用于探索保障人类温饱需求的粮食单产:

$$LFPD = \frac{PT \times PAF}{LA}$$

(12)

式中:LFPD 为耕地粮食单产;PT 为人口总数;PAF

为人均粮食标准,本文取 350 kg; $LA$  为耕地面积.

其次,计算单位面积耕地粮食产值底线.通过 2011 年黄骅市统计年鉴<sup>[33]</sup> 中小麦价格计算耕地粮食产值底线.

最后,计算生态安全底线.将上述耕地粮食底线产值看作耕地物质生产能力的底线值,根据单位面积生态系统服务价值中各地类价值比例关系,折算最低生态系统服务价值,即生态安全底线.

1.6 生态安全底线时间估算方法

地类的转换、建设用地的增加和耕地的减少不会随时间变化呈加剧趋势,各地类面积的供应主要受土地利用总体规划上级下达的指标控制,各指标不会出现随时间递增或递减趋势,尤其是新增建设用地、耕地保有量等指标.因此,各地类面积历年呈平稳变化趋势,用平均变化速率分析生态安全底线,理论上能准确地反映生态系统服务价值变化趋势.

2 结果与分析

2.1 植被净第一生产力的空间分布

黄骅市 2011 年全年植被净第一生产力 (NPP) 总量达  $15.95 \times 10^{12}$  g C,单位面积平均 NPP 量约为  $727.54 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,变化范围为  $0 \sim 1008 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ .NPP 低值区明显集中在沿海,主要地类为盐田和港口等建设用地,高值区除沿海外,在全区较均匀分布.

2.2 单位面积生态系统服务价值

2011 年,黄骅市各地类单位面积生态系统服务价值构成中,湿地价值量最大,达  $14.95 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ ,贡献率达 30.6%,湿地的娱乐文化功能、水源涵养功能和养分循环功能突出;其次是水域,价值量为  $7.30 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ ,贡献率为 14.9%,其水源涵养功能和养分循环功能较强;建设用地的价值量最低,为  $2.44$

$\text{元} \cdot \text{m}^{-2}$ ,贡献率仅有 5.0%;园地、耕地、草地、其他土地、盐田和盐碱地的单位面积价值量依次降低 (表 2).

由图 5 可以看出,生态系统服务价值高的区域集中在黄骅市东北部湿地地区和 22 条天然河流与人工排水干渠;东部沿海主要是港口码头和盐场用地,植被少,生态系统服务价值低;其余地区的生态系统服务价值分布均匀.其中,北部生态系统服务价值整体高于南部.北部齐家务乡、官庄乡和吕桥镇紧邻天津市,建设初期实施“接轨天津”战略,注重生态环境保护;齐家务乡发展以冬枣产业为特色的生态旅游业,官庄乡注重耕地保护及盐碱地改良,吕桥镇东部有大面积湿地和水域;南大港产业园区有著名的湿地保护区,因此,整体生态系统服务价值高.南部主要有黄骅镇和旧城镇,该区域城市化进程快,建设用地持续增加,城郊农用地利用强度高,农药、化肥投放量增加,耕地质量呈下降趋势,故生态系统服务价值低.黄骅市西部生态系统服务价值整体高于东部.西部距离渤海岸较远,盐碱程度相对较轻,主要分布园地和耕地,生态系统服务价值较高;东部的南排河镇和黄骅港大力发展港口经济,交通运输及仓储等建设用地面积广,港口部分湿地转换为盐田导致生态系统服务价值较低.

2.3 生态安全底线值

2011 年,研究区单位面积耕地粮食产量底线为  $2072.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,即  $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ .黄骅市 2011 年小麦平均价格取值为  $2 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,则粮食产值底线为  $4144.86 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,即  $0.41 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ .黄骅市单位面积土地生态系统服务价值底线值为  $21.58 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$  (表 3),全市土地生态服务总价值底线值为

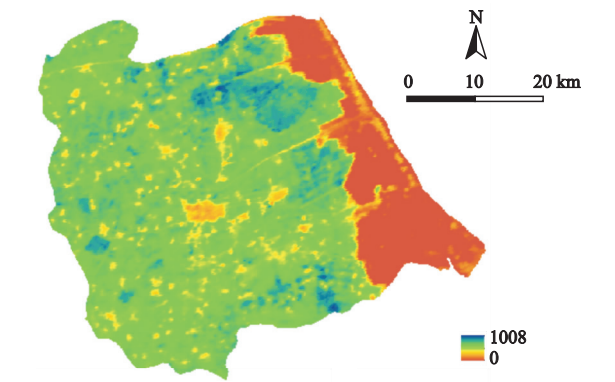


图 4 2011 年黄骅市 NPP 的空间分布  
Fig.4 Spatial distribution of NPP in Huanghua City in 2011 ( $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

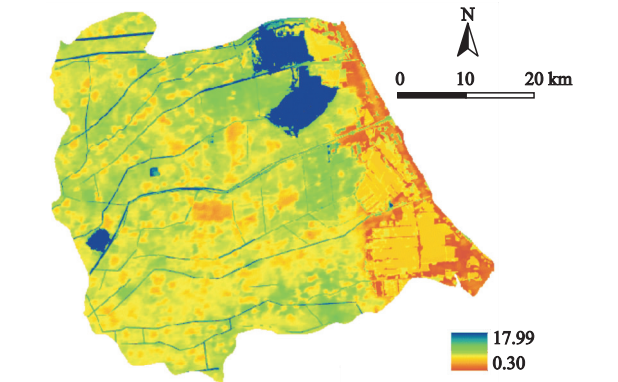


图 5 2011 年黄骅市生态系统服务价值的空间分布  
Fig.5 Spatial distribution of ecosystem service value in Huanghua City in 2011 ( $\text{yuan} \cdot \text{m}^{-2}$ ).



表 2 2011 年黄骅市单位面积生态系统服务价值  
Table 2 Ecosystem service value per unit area in Huanhua City in 2011 ( yuan · m<sup>-2</sup> )

| 生态系统功能<br>Ecosystem function        | 耕地<br>Cultivated land | 园地<br>Garden | 草地<br>Meadow | 建设用地<br>Construction land | 水域<br>Water | 盐碱地<br>Saline and alkaline land | 湿地<br>Wetland | 盐田<br>Salt pan | 其他土地<br>Other land | 总价值<br>Total value |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|---------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 物质生产<br>Material production         | 0.93                  | 0.89         | 0.85         | 0.50                      | 0.53        | 0.47                            | 0.78          | 0.05           | 0.77               | 5.77               |
| 养分循环<br>Nutrient cycling            | 1.76                  | 1.86         | 1.79         | 1.01                      | 2.04        | 1.09                            | 1.92          | 0.13           | 1.55               | 13.15              |
| 水源涵养<br>Water conservation          | 0.45                  | 0.41         | 0.31         | 0.00                      | 2.55        | 0.16                            | 2.84          | 2.72           | 0.45               | 9.89               |
| 气体调节<br>Gas regulation              | 0.65                  | 0.67         | 0.66         | 0.36                      | 0.38        | 0.68                            | 0.64          | 0.03           | 0.56               | 4.63               |
| 气候调节<br>Climate regulation          | 0.26                  | 0.27         | 0.26         | 0.14                      | 0.15        | 0.27                            | 0.26          | 0.01           | 0.22               | 1.84               |
| 净化环境<br>Environment purification    | 0.00                  | 0.01         | 0.01         | 0.00                      | 0.04        | 0.00                            | 0.04          | 0.01           | 0.00               | 0.11               |
| 生物多样性维持<br>Biodiversity maintenance | 0.48                  | 0.48         | 0.48         | 0.43                      | 0.43        | 0.45                            | 0.99          | 0.43           | 0.47               | 4.64               |
| 娱乐文化<br>Entertainment and culture   | 0.00                  | 0.20         | 0.01         | 0.00                      | 1.18        | 0.00                            | 7.48          | 0.00           | 0.00               | 8.87               |
| 总价值<br>Total value                  | 4.53                  | 4.78         | 4.37         | 2.44                      | 7.30        | 3.12                            | 14.95         | 3.38           | 4.02               | 48.90              |

表 3 黄骅市单位面积土地生态系统服务价值底线  
Table 3 Lowest ecosystem service value per unit area in Huanhua City ( yuan · m<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup> )

| 生态系统功能<br>Ecosystem function        | 耕地<br>Cultivated land | 园地<br>Garden | 草地<br>Meadow | 建设用地<br>Construction land | 水域<br>Water | 盐碱地<br>Saline and alkaline land | 湿地<br>Wetland | 盐田<br>Salt pan | 其他土地<br>Other land | 总价值<br>Total value |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|---------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 物质生产<br>Material production         | 0.41                  | 0.39         | 0.37         | 0.22                      | 0.23        | 0.21                            | 0.34          | 0.02           | 0.34               | 2.53               |
| 养分循环<br>Nutrient cycling            | 0.78                  | 0.82         | 0.79         | 0.45                      | 0.90        | 0.48                            | 0.85          | 0.06           | 0.68               | 5.81               |
| 水源涵养<br>Water conservation          | 0.20                  | 0.18         | 0.14         | 0.00                      | 1.12        | 0.07                            | 1.25          | 1.20           | 0.20               | 4.36               |
| 气体调节<br>Gas regulation              | 0.29                  | 0.30         | 0.29         | 0.16                      | 0.17        | 0.30                            | 0.28          | 0.01           | 0.25               | 2.05               |
| 气候调节<br>Climate regulation          | 0.11                  | 0.12         | 0.11         | 0.06                      | 0.07        | 0.12                            | 0.11          | 0.00           | 0.10               | 0.80               |
| 净化环境<br>Environment purification    | 0.00                  | 0.00         | 0.00         | 0.00                      | 0.02        | 0.00                            | 0.02          | 0.00           | 0.00               | 0.04               |
| 生物多样性维持<br>Biodiversity maintenance | 0.21                  | 0.21         | 0.21         | 0.19                      | 0.19        | 0.20                            | 0.44          | 0.19           | 0.21               | 2.05               |
| 娱乐文化<br>Entertainment and culture   | 0.00                  | 0.09         | 0.00         | 0.00                      | 0.52        | 0.00                            | 3.30          | 0.00           | 0.00               | 3.91               |
| 总价值<br>Total value                  | 2.00                  | 2.11         | 1.93         | 1.08                      | 3.22        | 1.38                            | 6.59          | 1.49           | 1.77               | 21.58              |

42.44 亿元(表 4).当全年生态系统服务价值降低到该数值时,各地类物质生产能力极低,人类将无法满  
足基本的温饱需求,气体调节、气候调节、水源涵养  
及净化环境等生态功能无法改善人类的基本生存需  
求,以人为主体的生态系统将濒临崩溃.

2.4 生态安全底线出现的时间

根据国家统计局网站中价格指数,以 2011 年黄  
骅市单位面积生态系统服务价值为基准折算出  
1996—2008 年单位面积生态系统服务价值,结合黄  
骅市地类面积变化数据,计算出黄骅市 1996—2008  
年生态系统服务价值呈降低趋势,总价值由 120.49

亿元降到 109.48 亿元.

1996—2008 年生态系统服务价值年均减少  
0.92 亿元,按此速率,73 年后生态系统服务价值为  
42.44 亿元,即 2081 年研究区生态系统将无法满  
足人类的基本需求.

2.5 生态安全格局构建

利用 ArcGIS 中自然断点功能,依据 2011 年黄  
骅市生态系统服务价值空间分布情况与生态安全底  
线值,将黄骅市分为生态核心保护区、生态缓冲区、  
生态恢复区和人类活动核心区(图 6).其中,生态  
核心保护区面积最小,为168.58 km<sup>2</sup>,占总面积的

表 4 黄骅市土地生态系统服务总价值底线  
Table 4 Lowest total value of ecosystem service in Huanhua City (×10<sup>8</sup> yuan)

| 生态系统功能<br>Ecosystem function        | 耕地<br>Cultivated land | 园地<br>Garden | 草地<br>Meadow | 建设用地<br>Construction land | 水域<br>Water | 盐碱地<br>Saline and alkaline land | 湿地<br>Wetland | 盐田<br>Salt pan | 其他土地<br>Other land | 总价值<br>Total value |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|---------------------------------|---------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 物质生产<br>Material production         | 3.17                  | 0.25         | 0.24         | 0.93                      | 0.33        | 0.71                            | 0.32          | 0.03           | 0.42               | 6.40               |
| 养分循环<br>Nutrient cycling            | 6.01                  | 0.53         | 0.50         | 1.87                      | 1.27        | 1.64                            | 0.78          | 0.09           | 0.84               | 13.53              |
| 水源涵养<br>Water conservation          | 1.54                  | 0.12         | 0.09         | 0.00                      | 1.58        | 0.24                            | 1.15          | 1.88           | 0.25               | 6.85               |
| 气体调节<br>Gas regulation              | 2.22                  | 0.19         | 0.19         | 0.67                      | 0.24        | 1.03                            | 0.26          | 0.02           | 0.31               | 5.13               |
| 气候调节<br>Climate regulation          | 0.89                  | 0.08         | 0.07         | 0.26                      | 0.09        | 0.41                            | 0.11          | 0.01           | 0.12               | 2.04               |
| 净化环境<br>Environment purification    | 0.00                  | 0.00         | 0.00         | 0.00                      | 0.02        | 0.00                            | 0.02          | 0.01           | 0.00               | 0.05               |
| 生物多样性维持<br>Biodiversity maintenance | 1.64                  | 0.14         | 0.14         | 0.80                      | 0.27        | 0.68                            | 0.40          | 0.30           | 0.26               | 4.63               |
| 娱乐文化<br>Entertainment and culture   | 0.00                  | 0.06         | 0.00         | 0.00                      | 0.73        | 0.00                            | 3.04          | 0.00           | 0.00               | 3.83               |
| 总价值<br>Total value                  | 15.47                 | 1.36         | 1.23         | 4.52                      | 4.53        | 4.70                            | 6.07          | 2.34           | 2.20               | 42.44              |

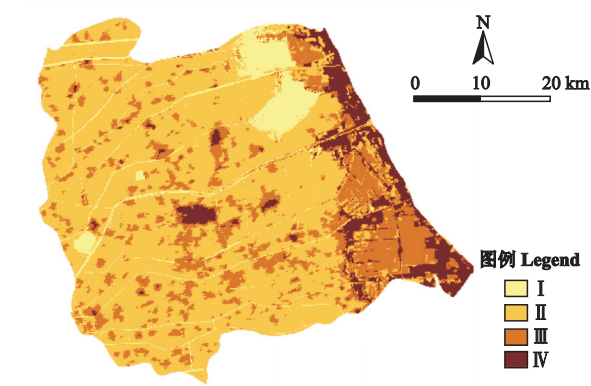


图 6 黄骅市生态安全格局  
Fig.6 Ecological security pattern of Huanghua City.  
I : 生态核心保护区 Ecological core protection zone; II : 生态缓冲区 Ecological buffer zone; III : 生态恢复区 Ecological restoration zone; IV : 人类活动核心区 Human activity core zone.

7.7%,生态核心保护区主要是湿地、水库和河流所在地,生态功能最强,是促进生态环境健康发展的核心区域.该区域内要注重对这些用地类型的维持保护,严格控制沿河、沿湿地建筑以实现对湿地、水域等生态用地的保护,并在湿地周边和河道两侧营造防护林带.

生态缓冲区面积最大,为 1400.33 km<sup>2</sup>,占总面积的 64.3%,主要是耕地、园地、草地和盐碱地.该区域生态结构较稳定,应注重加强生态建设、限制建设用地扩张、引导自然斑块分散地加入到建设用地周围,以实现对人类活动产生的生态负效应的缓冲及调节作用.

生态恢复区面积为 436.58 km<sup>2</sup>,占总面积的

20.1%,该区域主要是农村居民点和沿海盐田,生态功能较脆弱.该区域应加强农村居民点内部生态网络的建设,选取耐盐碱树种提高绿化及美化效果.

人类活动核心区主要分布在城镇中心及沿海的港口码头,面积为 172.34 km<sup>2</sup>,占总面积的 7.9%,人类活动非常集中,生态功能脆弱.该区域内部应加宽道路两侧绿化带的宽度并修建公园等休闲场所,提高绿化带及园内树种的多样性,扩大现有绿地面积,增强各绿地之间的连通度.

### 3 讨 论

生态安全与粮食安全的最佳结合点是价值,粮食安全可通过产值体现,生态安全可用生态系统服务价值表达;2 个安全的最佳结合通道是地类,不同地类体现出不同物质生产能力,伴随其他生态服务功能发生;2 个安全的最佳结合方式是将粮食按热量转化为耕地产出,计算耕地物质生产价值,通过耕地与其他地类的生态系统服务价值关系间接计算总生态系统服务价值.

2011 年,黄骅市各地类单位面积生态系统服务价值大小依次为:湿地>水域>园地>耕地>草地>其他土地>盐田>盐碱地>建设用地;各单项生态系统服务价值贡献率从大到小依次为:养分循环>水源涵养>娱乐文化>物质生产>生物多样性维持>气体调节>气候调节>净化环境.

按粮食温饱底线——人均 350 kg 粮食、自给率 100%、小麦平均价格 2 元·kg<sup>-1</sup>进行计算,得出单位面积耕地粮食产量底线 0.21 kg·hm<sup>-2</sup>,粮食产值底



线为  $0.41 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ , 单位面积土地生态系统服务价值底线值为  $21.58 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$ , 黄骅市土地生态服务总价值底线值为 42.44 亿元。

根据 1996—2008 年生态系统服务价值, 用平均变化速率计算得出 73 年后以人为主体的生态系统将濒临崩溃。若没有有效的人口控制措施、粮食增产技术及生态治理措施, 2081 年生态安全达到底线。

黄骅市可分为生态核心保护区、生态缓冲区、生态恢复区和人类活动核心区。生态核心保护区面积为  $168.58 \text{ km}^2$ , 占总面积的 7.7%, 区域生态功能最强; 生态缓冲区面积为  $1400.33 \text{ km}^2$ , 占总面积的 64.3%, 区域生态结构稳定; 生态恢复区面积为  $436.58 \text{ km}^2$ , 占总面积的 20.1%, 区域生态功能较脆弱; 人类活动核心区面积为  $172.34 \text{ km}^2$ , 占总面积的 7.9%, 区域人类活动集中, 生态功能脆弱, 生态安全性低。

由于资料获取的限制, 本文选取的遥感影像为 Landsat 7 ETM<sup>+</sup> 影像, 空间分辨率为 30 m, 若能选取分辨率更高的影像作为基础影像, 获取的数据会更加精确。

本文计算了除土壤侵蚀功能价值以外的其余 8 项生态系统服务功能价值。研究区濒临渤海, 海拔在 1~7 m, 且属于构造下沉地区, 目前还未找到针对该地形区的土壤侵蚀模型, 笔者曾尝试用改进的通用土壤侵蚀模型 (RUSLE) 进行土壤侵蚀量及价值估算, 得出了计算结果, 但仍不确定该模型的适用性, 同时滨海地区土壤侵蚀量很低, 以致本文放弃土壤侵蚀功能价值计算。未来应加大对构造下沉地区土壤侵蚀与保持功能价值定量评估方法的研究。

## 参考文献

- [1] Xiao D-N (肖笃宁), Chen W-B (陈文波), Guo F-L (郭福良). On the basic concepts and contents of ecological security. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(3): 354–358 (in Chinese)
- [2] Tian Y-W (田耀武), Xiao W-F (肖文发), Huang Z-L (黄志霖). Ecosystem services value of converting cropland to forestland in Heigou watershed in Three Gorges Reservoir area based on AnnAGNPS model. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2011, **30**(4): 670–676 (in Chinese)
- [3] Beesley KB, Ramsey D. Agricultural Land Preservation. *International Encyclopedia of Human Geography*, 2009, **25**: 65–69
- [4] Pei H (裴欢), Wei Y (魏勇), Wang X-Y (王晓妍), et al. Method of cultivated land landscape ecological security valuation and its application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2014, **30**(9): 212–219 (in Chinese)
- [5] Zhang Y (张杨), Yan J-M (严金明), Jiang P (江平), et al. Normal cloud model based evaluation of land resources ecological security in Hubei Province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2013, **29**(22): 252–258 (in Chinese)
- [6] Li M-Y (李明月), Lai X-J (赖笑娟). Evaluation on ecological security of urban land base on BP neural network: A case study of Guangzhou. *Economic Geography* (经济地理), 2011, **31**(2): 289–293 (in Chinese)
- [7] Su Y-X (苏泳娴), Zhang H-O (张虹鸥), Chen X-Z (陈修治), et al. The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(5): 1524–1534 (in Chinese)
- [8] Peng J (彭建), Tao J-X (陶静娴), Liu Y-X (刘焱序). Temporal characteristics of ecological risk assessment indicators in coal mining city with the application of LQV methods. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(3): 867–874 (in Chinese)
- [9] Wackernagel M. Methodological advancements in footprint analysis. *Ecological Economics*, 2009, **68**: 1925–1927
- [10] Xiang S-J (向书坚), Chai S-G (柴士改). Deficiencies and improvements to ecological footprint theory and practice. *Resources Science* (资源科学), 2013, **35**(5): 1051–1058 (in Chinese)
- [11] Cao Z (曹智), Min Q-W (闵庆文), Liu M-C (刘某承), et al. Ecosystem-service-based ecological carrying capacity: Concept, content, assessment model and application. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2015, **30**(1): 1–11 (in Chinese)
- [12] Wang K-F (王奎峰), Li N (李娜), Yu X-F (于学峰), et al. Eco-environmental carrying capacity evaluation index system based on the concept of P-S-R model: A case study in Shandong Peninsula. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2014, **34**(8): 2133–2139 (in Chinese)
- [13] Xie X-F (解雪峰), Wu T (吴涛), Xiao C (肖翠), et al. Ecological security assessment of the Dongyang River Watershed using PSR modeling. *Resources Science* (资源科学), 2014, **36**(8): 1702–1711 (in Chinese)
- [14] Zhang R (张锐), Zheng H-W (郑华伟), Liu Y-Z (刘友兆), et al. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(16): 5090–5100 (in Chinese)
- [15] Yu K-J (俞孔坚), Qiao Q (乔青), Li D-H (李迪华), et al. Ecological landuse in three towns of eastern Beijing: A case study based on landscape security pattern analysis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(8): 1932–1939 (in Chinese)
- [16] Zhang L (张利), Zhang L (张乐), Wang G-Y (王观湧), et al. Study on construction of ecological infrastructure in CaoFeidian New Area based on landscape

- security pattern. *Soils* (土壤), 2014, **46**(3): 555–561 (in Chinese)
- [17] Yu K-J (俞孔坚), Wang S-S (王思思), Li D-H (李迪华), *et al.* Ecological baseline for Beijing's urban sprawl: Basic ecosystem, services and their security patterns. *City Planning Review* (城市规划), 2010, **34**(2): 19–24 (in Chinese)
- [18] Chen Z-X (陈仲新), Zhang X-S (张新时). The value of ecosystem in China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2000, **45**(1): 17–22 (in Chinese)
- [19] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [20] Standardization Administration of the People's Republic of China (中国国家标准管理委员会). Current Land Use Condition Classification. China's National Standard (GB/T 21010–2007). Beijing: China Standards Press, 2007 (in Chinese)
- [21] Liu C-Y (刘春雨), Dong X-F (董晓峰), Liu Y-Y (刘英英). Distribution pattern of NPP based on the transformation of different scales in Great Dun Huang. *Resources Science* (资源科学), 2014, **36**(2): 406–412 (in Chinese)
- [22] Guo W (郭伟). Valuation of Ecosystem Services based on Remote Sensing and Landscape Pattern Optimization in Beijing. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2012 (in Chinese)
- [23] Costanza R, Arge R, Groot R, *et al.* The value of the world ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253–260
- [24] Xie G-D (谢高地), Zhen L (甄霖), Lu C-X (鲁春霞), *et al.* Expert knowledge, based on valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2008, **23**(5): 911–919 (in Chinese)
- [25] Wang Y-S (王友生), Yu X-X (余新晓), He K-N (贺康宁), *et al.* Ecosystem services value based on land use change in Huairou Reservoir watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(5): 246–251 (in Chinese)
- [26] State Forestry Bureau (国家林业局). Specifications for Assessment of Forest Ecosystem Services in the PRC. China's Forestry Industry Standard. Beijing: State Forestry Bureau, 2008 (in Chinese)
- [27] Xiao G-A (肖国安). Chinese grain supply and demand forecast over the next 10 years. *Chinese Rural Economy* (中国农村经济), 2002(7): 9–14 (in Chinese)
- [28] Huang P-M (黄佩民). Study on the road of the food security. *Ancient and Modern Agriculture* (古今农业), 2004(3): 1–10 (in Chinese)
- [29] Liao Y-S (廖永松), Huang J-K (黄季焜). A predicative analysis of the grain demand in the nine major Chinese river basins in the 21st century. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology* (南水北调与水利科技), 2004, **2**(1): 29–32 (in Chinese)
- [30] Luo L-G (罗良国), Li N-H (李宁辉), Yang J-C (杨建仓). Basic judgment on grain production and consumption in China. *Issues in Agricultural Economy* (农业经济问题), 2005(2): 49–52 (in Chinese)
- [31] Long F (龙方). A study of the problem of food security in China in the new century. *Journal of Hunan Agricultural University* (Social Science) (湖南农业大学学报: 社会科学版), 2007, **8**(3): 7–14 (in Chinese)
- [32] Zhao Z-J (赵子军). Research on Food Security in China. PhD Thesis. Tianjin: Tianjin University, 2011 (in Chinese)
- [33] Department of Statistics in Huanghua (黄骅市统计局). Statistical Yearbook in Huanghua. Huanghua: Department of Statistics in Huanghua, 2012 (in Chinese)

作者简介 何玲,女,1980年生,副教授,博士研究生。主要从事土地生态、土地持续利用与土地整治研究。E-mail: helingsss@163.com

责任编辑 杨弘