

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.024

# 耕地健康产能多要素评价体系构建与应用

高璐璐<sup>1</sup> 张超<sup>1,2</sup> 吕雅慧<sup>1</sup> 陈婉铃<sup>1</sup> 鄢文聚<sup>2,3</sup> 马佳妮<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100083; 3. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035)

**摘要:** 从耕地及其周边生态系统角度出发, 构建了“需求—功能—维度—要素—指标”的耕地健康产能评价框架, 该框架包括耕地产能和耕地健康 2 个维度, 以及气候条件、土壤特性、利用状况、环境胁迫状况和有益生态状况 5 个要素, 结合研究区特点建立了耕地健康产能评价指标体系; 利用国产 GF-1 遥感数据获取植被覆盖度、生物多样性等关键指标信息, 对耕地健康产能进行客观评价; 最后, 选择我国松嫩平原的吉林省大安市为研究区, 进行实例应用。研究表明, 大安市耕地健康优等和健康低等占总面积的 40.35% 和 52.07%, 亚健康优等和亚健康低等比例较低, 占 7.58%, 耕地健康状况总体良好, 耕地产能较低; 耕地健康产能主要受利用状况、有益生态状况影响, 土壤特性影响次之。本文构建的耕地健康产能评价体系是对已有耕地质量评价方法的扩展, 可为耕地合理利用与可持续发展提供科学支撑。

**关键词:** 耕地健康; 耕地产能; 土壤特性; 有益生态状况; 遥感

中图分类号: F301.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0215-08

OSID:



## Construction and Application of Multi-factor Cultivated Land Health Productivity Evaluation System

GAO Lulu<sup>1</sup> ZHANG Chao<sup>1,2</sup> LÜ Yahui<sup>1</sup> CHEN Wanling<sup>1</sup> YUN Wenju<sup>2,3</sup> MA Jiani<sup>1</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Land Quality Monitoring and Control, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China

3. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

**Abstract:** In order to strengthen the protection of quantity, quality and ecology of arable land, it is necessary to grasp the situation of farmland comprehensively. From the perspective of cultivated land and its surrounding ecosystem, the framework of cultivated land health productivity was constructed as “demand – function – dimension – element – index”, which included two dimensions of cultivated land productivity and cultivated land health, and five dimensions of climatic conditions, soil characteristics, utilization status, environmental stress status and beneficial ecological status. Then, according to the characteristics of the study area, the evaluation index system of cultivated land health productivity was established. At the same time, the key indicators such as vegetation coverage and biodiversity were obtained by using domestic GF-1 remote sensing data, and the healthy productivity of cultivated land was evaluated objectively. Finally, Da’an City, Jilin Province, in the Songnen Plain of China, was selected as the research area to carry out case studies. The results showed that in Da’an City, totally 40.35% and 52.07% of the total cultivated land were health-superior and health-inferior cultivated lands, respectively, while 7.58% was sub-health-superior and sub-health-inferior cultivated land. The health status of cultivated land was generally good, and the productivity of cultivated land was relatively low; the healthy productivity of cultivated land was mainly affected by the utilization and beneficial ecological conditions, and the influence of soil characteristics was the second. The evaluation system of farmland health productivity was an extension of the existing evaluation methods of cultivated land, which can provide scientific support for rational utilization and sustainable development of cultivated land.

**Key words:** cultivated land health; cultivated land productivity; soil properties; beneficial ecological condition; remote sensing

收稿日期: 2019-08-21 修回日期: 2019-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0206801)

作者简介: 高璐璐(1991—), 女, 博士生, 主要从事 3S 在土地领域的应用研究, E-mail: wawjll@126.com

通信作者: 张超(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感在土地和农业领域的应用研究, E-mail: zhangchaohj@cau.edu.cn



需求<sup>[21]</sup>。因此,本文界定的耕地健康产能,即耕地需要满足:支撑农作物持续、稳定地生长;自我净化能力;一定时间内抗逆境胁迫的回复能力;维持动物、植物、土壤微生物等正常活动,保证生物丰富多样;保障生态系统稳定性和持续性,维持耕地所在生态系统的健康<sup>[22-23]</sup>等。已有耕地健康产能评价相关研究主要从耕地产能<sup>[3]</sup>、土壤质量和土壤环境<sup>[16]</sup>等角度反映耕地的生产能力、环境、污染状况,无法体现耕地生态系统的健康状况。本文在已有研究基础上,加入生态系统健康,对耕地进行综合评价。耕地健康产能包含耕地产能和耕地健康 2 个评价维度,包括气候条件、土壤特性、利用状况、环境胁迫状况和有益生态状况 5 个要素。气候条件宏观上对农作物的生产起到控制性作用;土壤是农作物生长的基础,土壤的物理和化学特性表达耕地的基础地力水平和土壤的限制性因素;在基础地力基础上,耕地的现代化利用状况进一步表征耕地的有效、合理利用水平。以上 3 个要素体现了耕地的产能状况。环境胁迫状况主要反映大气、水、土壤等非闭合空间的贮藏和自我净化的能力;有益生态状况通过生物丰富程度表示生态系统的稳定性和回复能力,这 2 个要素反映耕地及其所在生态系统的健康状况。基于

以上分析,借鉴前人研究成果<sup>[24]</sup>,本文构建了“需求—功能—维度—要素—指标”的耕地健康产能评价理论框架,如图 2 所示。在农用地质量分等、土壤环境质量、生态环境状况评价等基础上,综合分析耕地健康产能的不同要素,以主导性、区域差异性和稳定性等为原则,建立了耕地健康产能评价指标体系,如表 1 所示。

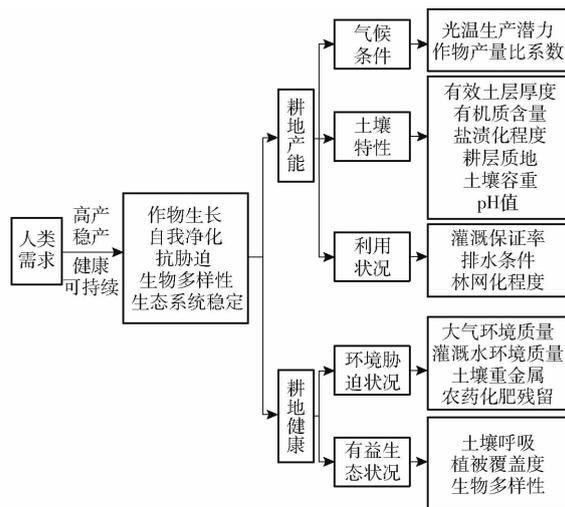


图 2 耕地健康产能评价框架

Fig. 2 Evaluation framework of healthy productivity of cultivated land

表 1 耕地健康产能评价指标及其权重

Tab. 1 Evaluation index and weight of healthy productivity of cultivated land

评价维度	评价要素	评价指标(权重)
耕地产能	气候条件	光温生产潜力、作物产量比系数
	土壤特性	有效土层厚度(0.1)、耕层质地(0.2)、土壤容重(0.1)、有机质含量(0.15)、pH 值(0.2)、盐渍化程度(0.25)
	利用状况	灌溉保证率(0.4)、排水条件(0.35)、林网化程度(0.25)
耕地健康	环境胁迫状况	大气环境质量(0.2)、灌溉水环境质量(0.2)、土壤重金属(0.4)、农药化肥残留(0.2)
	有益生态状况	土壤呼吸(0.3)、植被覆盖度(0.35)、生物多样性(0.35)

## 2.2 评价指标计算与分级

气候条件要素指标数据通过查阅统计资料获取;土壤特性、利用状况及环境胁迫状况等要素指标和有益生态状况要素中土壤呼吸指标数据主要来自于实地调查、取样化验及相关部门数据;有益生态状况要素中植被覆盖度与生物多样性指标,通过遥感数据分析结合实地调查获取。

植被覆盖度指耕地评价单元中农作物生长期内的植被覆盖程度,本文利用 2017 年 5—8 月 6 期 GF-1 WFV 数据,预处理后分别计算归一化差值植被指数(NDVI),利用 NDVI 月最大值的均值表示植被覆盖度。生物多样性表征评价单元中生物的丰富度,反映生态系统的回复能力和补偿能力。本文在遥感影像分类基础上,结合实地调查数据,计算生物多样性指数,计算式为

$$D = - \sum_{K=1}^N P_K \ln P_K \quad (1)$$

式中  $D$ ——生物多样性指数

$K$ ——耕地图斑中植被的类型序号

$N$ ——耕地图斑中植被类型的总数

$P_K$ ——植被类型  $K$  在耕地图斑中出现的概率

耕地健康产能各指标的分级及赋分标准分别依据《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)、《耕地质量等级》(GB/T 33469—2016)、《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015)等,有益生态状况要素中植被覆盖度与生物多样性指标采用自然断点法分级。采用层次分析法和专家打分法确定各指标权重(表 1)。

## 2.3 耕地健康产能计算与分级

耕地健康产能评价采用耕地产能和耕地健康 2 个因素指数叠加法。耕地产能指数计算采用连乘

法,其中气候条件指数用光温生产潜力指数和作物产量比系数表示;土壤特性指数和利用状况指数分别采用加权求和法,即对耕地评价单元的评价指标及其权重进行指数综合,计算式为

$$C = WSU \quad (2)$$

其中  $W = LR \quad (3)$

$$S = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i / 100 \quad (4)$$

$$U = \sum_{i=1}^n \beta_i X_i / 100 \quad (5)$$

式中  $C$ ——耕地产能指数  
 $W$ ——气候条件指数  
 $S$ ——土壤特性指数  
 $U$ ——利用状况指数  
 $L$ ——光温生产潜力指数  
 $R$ ——作物产量比系数  
 $\alpha_i, \beta_i$ ——指标权重  
 $X_i$ ——指标分值  
 $n$ ——评价指标数量

结合大安市的具体情况,耕地产能指数被划分为优等(1 350, 1 600]、良等(1 100, 1 350]、中等(850, 1 100]、低等[600, 850] 4个等级。耕地健康指数计算也采用连乘法,其中环境胁迫状况指数和有益生态状况指数计算式为

$$H = EB \quad (6)$$

其中  $E = 1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i X_i \quad (7)$

$$B = 1 + \sum_{i=1}^n \delta_i X_i \quad (8)$$

式中  $H$ ——耕地健康指数  
 $\gamma_i, \delta_i$ ——指标权重  
 $E$ ——环境胁迫状况指数  
 $B$ ——有益生态状况指数

耕地健康指数表示指标对耕地健康影响程度,指数的分值越高,表示耕地健康状况越好,用[0, 2]对维度指数进行定量化分级,划分为AAAA健康(1.75, 2]、AAA健康(1.5, 1.75]、AA健康(1.25, 1.5]、A健康(1, 1.25]、不健康[0, 1] 5个等级。

#### 2.4 耕地健康产能指标贡献分值计算

综合考虑耕地健康产能评价各个指标的权重、分级得分及其比例情况,对耕地健康产能评价中各个指标的贡献情况进行分析,从而得到耕地健康产能各个要素的控制指标因素,计算式为

$$Y_i = f_i \sum_{i=1}^n y_i q_i \quad (9)$$

式中  $Y_i$ ——指标贡献分值

$f_i$ ——指标权重

$y_i$ ——指标等级得分

$q_i$ ——指标等级比例

### 3 结果及分析

#### 3.1 不同要素和指标的评价结果分析

大安市主要种植作物为水稻和春玉米,其光温生产潜力指数分别为1 701和2 727,在《农用地质量分等规程》(GB/T 28407—2012)中作物产量比系数分别为1和0.644,经计算大安市域内各耕地图斑的气候条件指数相差不大。大安市土壤特性指数在[0.67, 0.92]之间,其中土壤特性优等耕地占大安市总耕地面积的99.42%,良等占0.58%,耕地的土壤整体状况较好。依据指标贡献度,如图3所示,大安市耕地土壤特性的控制指标为耕层质地和盐渍化程度,耕层质地为黏土和砂土的耕地占29.1%,重度盐化、中度盐化和轻度盐化的耕地占14.19%。大安市利用状况优等、良等、中等耕地分别占大安市总耕地面积的61.23%、38.60%、0.17%,其中,良等、中等耕地主要分布在大安市的北部、西部等地区(图4c),主要受灌溉保证率和林网化程度的影响,灌溉保证率一般满足的耕地占大安市总耕地面积的71.54%,林网化程度一般及低等的耕地占总耕地面积的40.63%和37.99%。

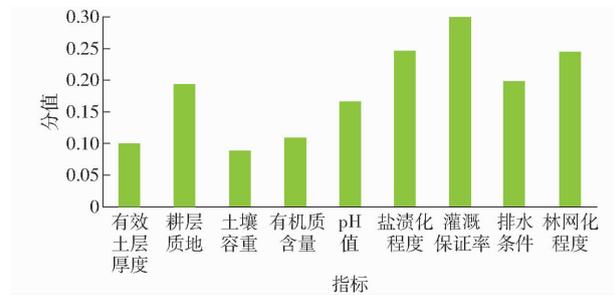


图3 土壤特性和利用状况指标在耕地健康产能评价中贡献分值

Fig. 3 Contribution score of soil characteristics and utilization status indicators in healthy productivity assessment of cultivated land

大安市耕地环境胁迫状况指数分布区间为[0.94, 0.98],因此环境胁迫状况均为优等。其中,大气环境、灌溉水环境、土壤重金属等均为清洁,环境胁迫主要受化肥、农药等过量施用的影响,如图5所示。有益生态状况指数范围为[1.34, 1.94],其优等、良等和中等耕地分别占大安市总耕地面积的69.17%、23.42%和7.41%,有益生态状况中等耕地主要分布在红岗子乡、太山镇、海坨乡和龙沼镇等乡镇(图4e),植被覆盖度和生物多样性是影响有益生态状况的重要指标,两者优等耕地分别占耕地总

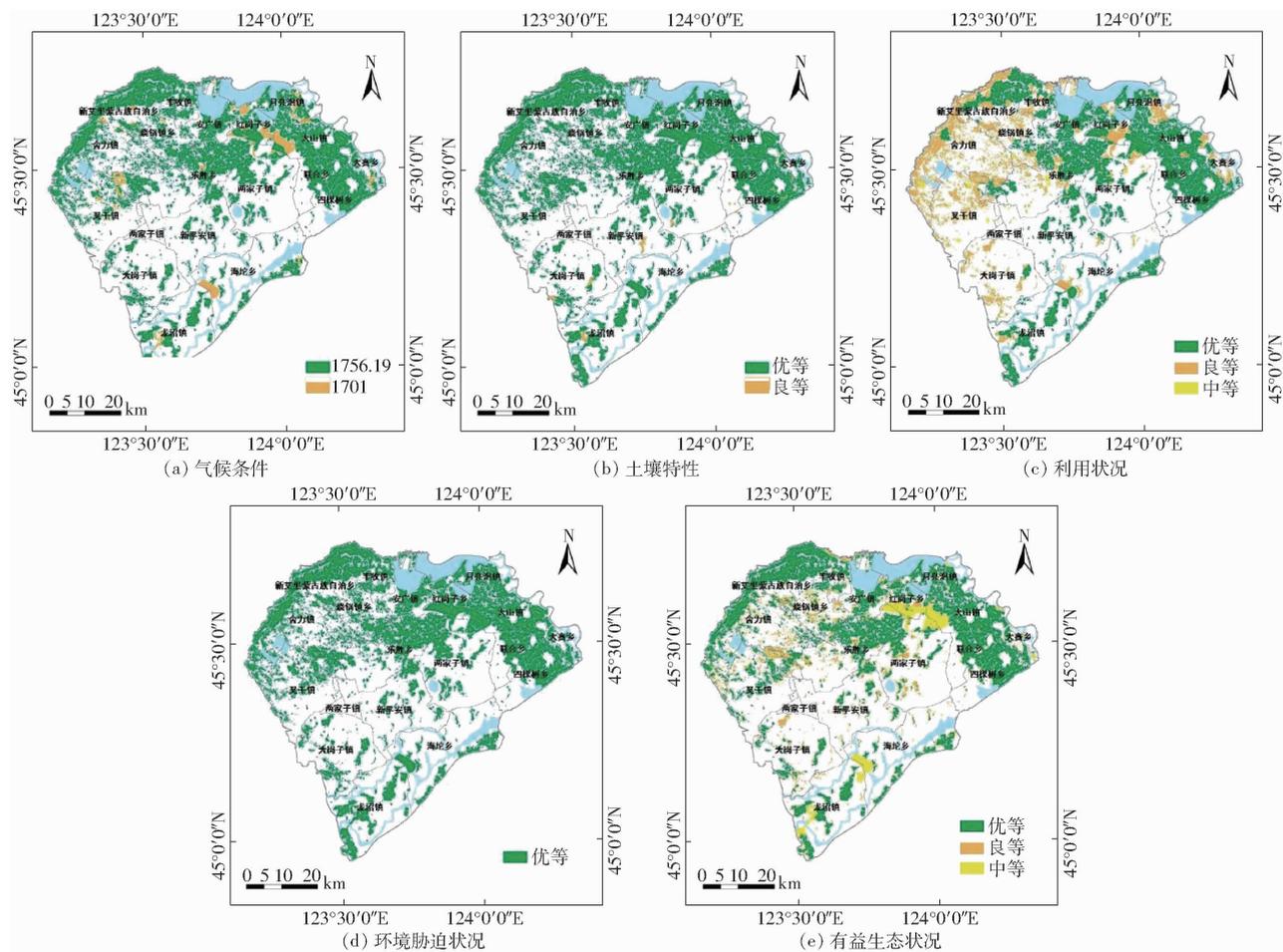


图 4 大安市耕地健康产能不同要素评价结果

Fig. 4 Evaluation results of different elements of healthy productivity of cultivated land in Da'an City

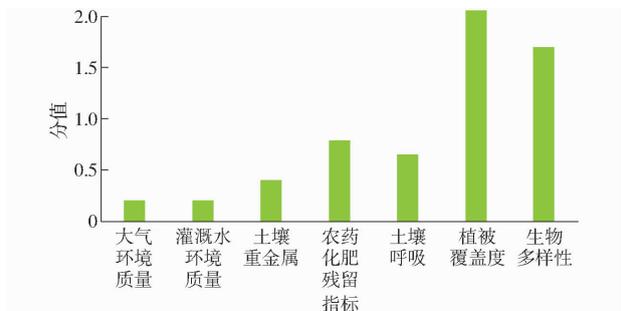


图 5 环境胁迫状况和有益生态状况指标在耕地健康产能等级评价中贡献分值

Fig. 5 Contribution score of environmental stress and beneficial ecological conditions indicators in healthy productivity assessment of cultivated land

面积的 68.19% 和 47.50%。

### 3.2 不同维度的评价结果分析

综合气候条件、土壤特性和利用状况 3 个要素评价耕地产能状况,经计算大安市耕地产能指数范围为 [618.81, 1 530.37], 主要为良等和中等, 分别占大安市耕地面积的 37.38% 和 45.19%; 优等占比为 6.67%, 主要分布在大安市的东北部; 低等占 10.76%, 主要在大安市的西北部及西南部等区域(图 6b)。根据 2014 年耕地质量等别年度更

新数据,大安市耕地质量国家利用等集中在 10 ~ 12 等别,如图 6a 所示,质量较高的 10 等地主要分布在北部,质量较低的 12 等地零星分布在新平安、大岗子等镇。将耕地产能评价结果与国家利用等成果进行对比分析,由于两者的评价指标和计算方法不同,分别用自然断点法对各评价成果指数分成 3 等,对比国家利用等与耕地产能评价结果的分等差距(图 6c),可以看出,等级一致的耕地占总面积的 38.06%,小差距(-1 和 1)占总面积的 54.06%,大差距(-2 和 2)占 7.87%,部分区域耕地产能等与国家利用等的评价结果有小幅差异,主要是农用地质量分等综合考虑了自然因素和作物产量,耕地产能包含了耕地的生产能力和利用状况等,本文的耕地产能评价是对农用地质量分等的延伸与发展。

从环境胁迫状况和有益生态状况 2 个要素评价耕地健康状况,大安市的耕地健康指数范围为 [1.28, 1.89],其中 AAAA 健康耕地占大安市总耕地面积的 61.87%; AAA 健康耕地占大安市的 30.55%, AA 健康耕地仅占 7.58%, 无 A 健康耕地和不健康耕地。AAA 健康耕地主要分布在大安市

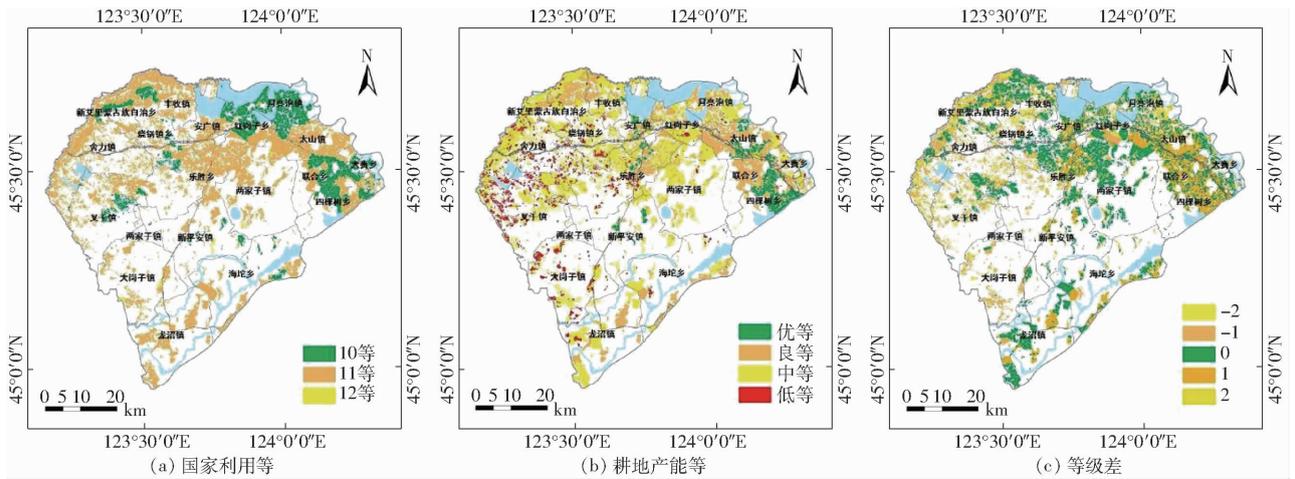


图6 大安市农用地国家利用等、耕地产能等及等级差距

Fig.6 National utilization of agricultural land, cultivated land productivity, and grade difference in Da'an City

西部和中部,以烧锅镇乡、舍力镇、叉干镇和两家子镇等乡镇为主;AA健康耕地主要分布在大安市中部和南部,以新岗子镇、两家子镇、海坨乡、龙沼镇等

为主(图7a);AAA健康和AA健康耕地主要分布在盐碱含量高的区域,土壤偏碱性,土壤呼吸较低,植被覆盖度和生物多样性较差。

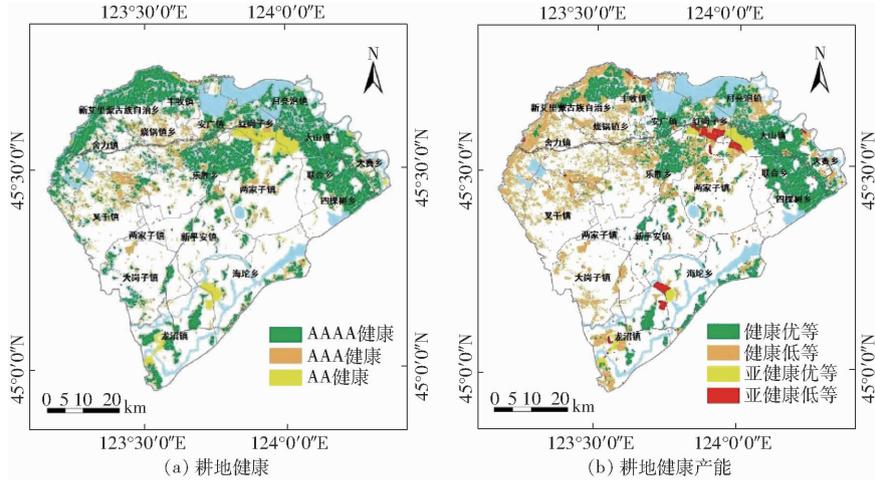


图7 大安市耕地健康及耕地健康产能分等

Fig.7 Grades of cultivated land health and health productivity in Da'an City

### 3.3 耕地健康产能评价结果分析

将耕地产能和耕地健康2个因素叠加分析,大安市健康优等耕地占大安市总耕地面积的40.35%,主要分布在大安市东北部、北部及东南部等地区;健康低等耕地占大安市的52.07%,主要分布在大安市西北部、北部及西南部等区域;亚健康优等和亚健康低等耕地比例比较低,分别占大安市的3.7%和3.88%;无不健康优等和低等耕地(图7b)。总体上,大安市耕地产能较低,耕地健康状况较好。

将耕地健康产能的气候条件指数按水稻和玉米2种作物区分,其他4个要素指数按0.25为间隔,划分为优等、良等、中等、低等4个等级,对比每个要素不同等级的比例(图8),耕地健康产能在气候条件限制下,受利用状况、有益生态状况要素影响较大,土壤特性次之,环境胁迫状况影响最小。综上,

健康优等耕地综合状况最好,耕地质量高,作物高产稳产,利用状况好,未受到任何污染,生态系统稳定、健康、可持续,可优先划定为永久基本农田和高标准农田;健康低等耕地的产量低,利用状况差,土壤清洁,生态系统健康,耕地的灌溉设施和防护林经过改善后可被划定为高标准农田建设区;亚健康优等耕地高产稳产且清洁,利用状况高,有益生态状况较差;亚健康低等耕地利用状况低,有益生态状况较差,亚健康优等和亚健康低等耕地需经改良后划定为永久基本农田。

### 4 结论

(1)沿用农用地分等中的部分内容,在耕地产能评价的基础上,同时兼顾耕地健康状态,综合评价耕地状况。从耕地本身和生态系统角度,构建了“需求—功能—维度—要素—指标”的耕地健康产

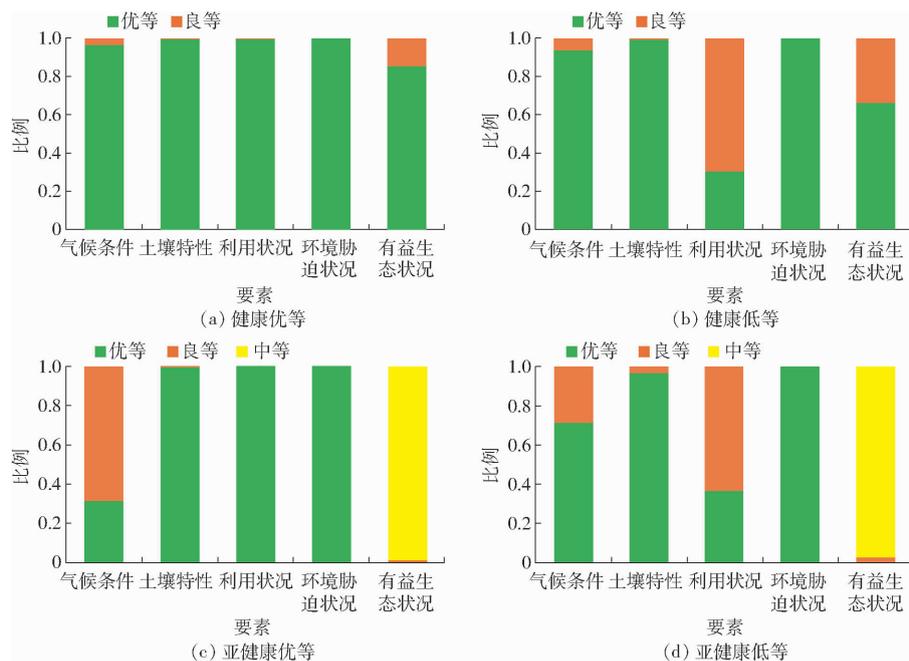


图8 大安市耕地健康产能不同等别的各要素比例

Fig. 8 Ratios of different elements of healthy productivity of cultivated land in Da'an City

能评价理论框架,其中要素包括气候条件、土壤特性、利用状况、环境胁迫状况和有益生态状况5方面,并在植被覆盖度、生物多样性等指标的计算中,充分利用了国产GF-1遥感数据,增加了数据可获取性和实时性。

(2)对大安市耕地进行健康产能评价应用,并与农用地质量分等结果进行对比,结果表明,大安市耕地健康状况较好,但产能较差;耕地健康产能受利用状况、有益生态状况要素影响比较大,其状况较差,主要受灌溉保证率、林网化程度、植被覆盖度和

生物多样性等指标的影响;土壤特性要素对耕地健康产能的影响次之,土壤质地和盐渍化程度等指标状况较差。本文方法可以综合评价耕地健康产能状况,为永久基本农田划定和高标准农田建设提供理论依据和技术支持。

(3)耕地健康产能评价指标存在地域差异性,因此,不同要素指标的选取需结合区域实际情况和发展需求进一步优化与选择。此外,生物多样性主要考虑了植被情况,对于动物活动评价有待丰富和完善。

## 参 考 文 献

- [1] 焦思颖. 2016年全国耕地质量等别更新评价主要成果发布[J/OL]. 中国国土资源报,2017-12-27. JIAO Siying. Main achievements of grade renewal assessment of cultivated land quality in 2016[J/OL]. China Land Resources Daily,2017-12-27. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2018中国生态环境状况公报[EB/OL]. 2019-05-29. Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Bulletin on China's ecological environment in 2018[EB/OL]. 2019-05-29. (in Chinese)
- [3] 雷鸣,孔祥斌,王佳宁. 水平衡下黄淮海平原区耕地可持续生产能力测算[J]. 地理学报,2018,73(3):535-549. LEI Ming, KONG Xiangbin, WANG Jianing. Estimation of sustainable grain productivity for arable land under water balance in the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Acta Geographica Sinica,2018,73(3):535-549. (in Chinese)
- [4] LIU J G, HUFFMAN T, GREEN M. Potential impacts of agricultural land use on soil cover in response to bioenergy production in Canada[J]. Land Use Policy,2018,75:33-42.
- [5] 马佳妮,张超,吕雅慧,等. 基于长时间序列遥感数据反演NPP的耕地质量评价[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):202-208. MA Jiani, ZHANG Chao, LÜ Yahui, et al. Cultivated land quality evaluation based on inversion of NPP based on long term sequence remote sensing data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):202-208. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190122&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190122&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.022. (in Chinese)
- [6] 李想,江雪昕,高红菊. 太湖流域土壤重金属污染评价与来源分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):247-253. LI Xiang, JIANG Xuexin, GAO Hongju. Pollution assessment and source analysis of soil heavy metals in Taihu Lake Basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):247-253. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s038&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s038&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.038. (in Chinese)

- [7] VILČEK J, KOCO S. Integrated index of agricultural soil quality in Slovakia[J]. *Journal of Maps*, 2018,14(2):68–76.
- [8] LIANG Z B, GAO L, ZHAO X F, et al. Assessment of metal pollution, its potential health risks, and origin in different land use types in Zhuhai City, China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019,76(2):295–307.
- [9] 鄯文聚,梁梦茵,汤怀志. 提升耕地质量重在健康产能建设[J]. *中国土地*, 2015(3):22–23.  
YUN Wenju, LIANG Mengyin, TANG Huaizhi. Improving the quality of cultivated land focuses on the construction of healthy productivity[J]. *China Land*, 2015(3):22–23. (in Chinese)
- [10] 高涵,陈伟强,鄯文聚. 耕地健康及其管理问题探讨[J]. *中国土地*, 2018(12):23–25.  
GAO Han, CHEN Weiqiang, YUN Wenju. Discussion on the health of cultivated land and its management[J]. *China Land*, 2018(12):23–25. (in Chinese)
- [11] TANG H Z, YUN W J, LIU W P, et al. Structural changes in the development of China's farmland consolidation in 1998—2017: changing ideas and future framework[J]. *Land Use Policy*, 2019,89:104212.
- [12] ELSE K B, BONGIORNO G, BAI Z G, et al. Soil quality—a critical review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,120:105–125.
- [13] 杨奇勇,谢运球,罗为群,等. 基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2017,48(12):248–254.  
CHEN Qiyong, XIE Yunqiu, LUO Weiqun, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil heavy metals content based on geostatistics[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(12):248–254. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171229&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171229&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.029. (in Chinese)
- [14] 陈云飞,曾妍妍,周金龙,等. 新疆于田县绿洲区土壤重金属空间分布特征与影响因素[J/OL]. *农业机械学报*, 2019,50(4):263–273.  
CHEN Yunfei, ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of soil heavy metal contents in Oasis Area of Yutian County, Xinjiang[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(4):263–273. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190430&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190430&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.030. (in Chinese)
- [15] 杨建宇,欧聪,李琪,等. 基于云模型的耕地土壤养分模糊综合评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2018,49(1):251–257.  
YANG Jianyu, OU Cong, LI Qi, et al. Fuzzy synthetic evaluation of soil nutrients in cultivated land based on cloud model in Da'an City, Jilin Province[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(1):251–257. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180131&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180131&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.031. (in Chinese)
- [16] MOEBIUS-CLUNE B N, MOEBIUS-CLUNE D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive assessment of soil health—the cornell framework[M]. New York: Cornell University, Ithaca, 2016.
- [17] 鲍丽然,李瑜,贾中民,等. 耕地质量地球化学评价及应用研究——以重庆市荣昌区为例[J]. *地球与环境*, 2018,46(1):96–105.  
BAO Liran, LI Yu, JIA Zhongmin, et al. Geochemical assessment and applications of cultivated land—taking Rongchang District, Chongqing City, China as an example[J]. *Earth and Environment*, 2018,46(1):96–105. (in Chinese)
- [18] 辛芸娜,范树印,孔祥斌,等. 四重质量维度下的县域耕地质量评价方法研究[J]. *资源科学*, 2018,40(4):737–747.  
XIN Yunna, FAN Shuyin, KONG Xiangbin, et al. Evaluation of cultivated land quality based on four quality dimensions[J]. *Resources Science*, 2018,40(4):737–747. (in Chinese)
- [19] 赵瑞,吴克宁,张小丹,等. 粮食主产区耕地健康产能评价——以河南省温县为例[J]. *中国土地科学*, 2019,33(2):67–75.  
ZHAO Rui, WU Kening, ZHANG Xiaodan, et al. Evaluation on farmland health productivity in main grain production areas: a case study in Wen County of Henan Province[J]. *China Land Science*, 2019,33(2):67–75. (in Chinese)
- [20] 杨建宇,张欣,李鹏山,等. 基于物元分析的区域土地生态安全评价方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017,48(增刊):238–246.  
YANG Jianyu, ZHANG Xin, LI Pengshan, et al. Evaluation method of regional land ecological security based on matter-element analysis[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(Supp.):238–246. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2017s037&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s037&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.037. (in Chinese)
- [21] 李强,严金明,赵焯. 耕地健康也需诊断[J]. *中国土地*, 2011(11):37–39.  
LI Qiang, YAN Jinming, ZHAO Ye. Farmland health also needs to be diagnosed[J]. *China Land*, 2011(11):37–39. (in Chinese)
- [22] 潘玉雪,田瑜,徐靖,等. IPBES 框架下生物多样性和生态系统服务情景和模型方法评估及对我国的影响[J]. *生物多样性*, 2018,26(1):89–95.  
PAN Yuxue, TIAN Yu, XU Jing, et al. Methodological assessment on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services and impacts on China within the IPBES framework[J]. *Biodiversity Science*, 2018,26(1):89–95. (in Chinese)
- [23] 董鹏宇,赵华甫. 耕地多功能权衡与协同关系研究——以上海市青浦区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019,28(2):131–138.  
DONG Pengyu, ZHAO Huaifu. Study on trade-off and synergy relationship of cultivated land multifunction: a case of Qingpu District, Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019,28(2):131–138. (in Chinese)
- [24] 孔祥斌,张蚌蚌,温良友,等. 基于要素-过程-功能的耕地质量理论认识及其研究趋势[J]. *中国土地科学*, 2018,32(9):14–20.  
KONG Xiangbin, ZHANG Bangbang, WEN Liangyou, et al. Theoretical framework and research trends of cultivated land quality based on elements-process-function[J]. *China Land Sciences*, 2018,32(9):14–20. (in Chinese)