

黎怡姗, 吴大放, 刘艳艳. 耕地生态风险评价研究热点与趋势——基于CiteSpace可视化分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 502-512.

LI Yi-shan, WU Da-fang, LIU Yan-yan. Hot spots and trends of cultivated land ecological risk evaluation: Visualization analysis based on CiteSpace[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(4): 502-512.

# 耕地生态风险评价研究热点与趋势 ——基于CiteSpace可视化分析

黎怡姗, 吴大放\*, 刘艳艳

(广州大学地理科学学院 国土与城镇规划研究所, 广州 510006)

**摘要:**耕地资源是进行农业生产的核心,对耕地生态进行风险评价,能够为人类活动对生态系统的影响提供预测。基于文献大数据分析软件和文献查阅方法,从Web of Science(WOS)核心数据库和CNKI数据库中有条件地分别筛选出380篇和306篇文章,采用CiteSpace V软件对目标领域的主题、关键词和WOS分类进行共现分析,对耕地生态风险评价研究领域的知识演化路径、研究内容和热点进行详细评述,旨在为未来耕地生态风险评价研究提供参考。结果表明:国内耕地生态风险评价研究的热点词聚类结果集中反映为“生态安全”“重金属”“生态足迹”“社会价值”和“耕地保护”五大类;国外耕地生态风险评价研究的热点词聚类结果集中反映为“农业灌溉土地”“土壤退化”“地统计分析”和“土地利用”四大类。通过研究得到三个方面的结论:①国外关于耕地生态风险评价的研究主题比较零散,主要集中在对耕地土壤重金属的分析与评估;②国内耕地生态风险评价的研究在2015—2017年进入活跃期,研究主题的演化趋势具有一定的政策指向性;③国外的耕地生态风险评价研究与国内的研究在方向和尺度上有很大的差异,具有明显的区域差异性。

**关键词:**耕地生态;耕地风险;生态风险评价;CiteSpace

中图分类号:F301.21

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0502-11

doi: 10.13254/j.jare.2018.0187

## Hot spots and trends of cultivated land ecological risk evaluation: Visualization analysis based on CiteSpace

LI Yi-shan, WU Da-fang\*, LIU Yan-yan

(Institute of Land Resources and Urban-Rural Planning, School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Cultivated land resources are the core of agricultural production. Having risk evaluation on cultivated land can predict the impact of human activities to the ecosystem. According to the analysis on big data and relative literature, 380 articles from the Web of Science(WOS) and 306 articles from CNKI were referenced. Analyzing the topics, keywords, and WOS classifications with CiteSpace V and summarizing on the knowledge evolution path, content and hot spots of the arable land ecological risk assessment researches, all of the study would provide a reference for future research on the ecological risk assessment of cultivated land. The result showed that the key words in domestic cultivated land ecological risk assessment were ecological security, heavy metal, ecological trace, social value and cultivated land protection. Clustering results of key words abroad were agricultural irrigated soil, soil degradation, geostatistical analysis and land use. It concluded: The researches on the ecological risk assessment of cultivated land abroad were scattered, but the main analysis was about heavy metals in cultivated land; The study on the evaluation of the ecological risk of cultivated land in China entered an active

收稿日期:2018-07-17 录用日期:2018-10-17

作者简介:黎怡姗(1993—),女,广东中山人,硕士研究生,研究方向为土地利用与规划。E-mail:2291730884@qq.com

\*通信作者:吴大放 E-mail:wudaf2004@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41101078);广东省研究生示范课程建设项目(2017SFKC32);广东省哲学社会科学“十三五”规划2017年度学科共建项目(GD17XGL44);广州市哲学社会科学“十三五”规划2019年度一般课题(2019GZYB83)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China(41101078); The Construction Program of the Graduate Student Demonstration of Guangdong Province, China(2017SFKC32); The Subject Co-construction Program in 2017 of the Philosophy and Social Science of Guangdong Province for the "13th Five-year Plan", China(GD17XGL44); Guangzhou Philosophy and Social Science Development "13th Five-Year Plan" 2019 General Project(2019GZYB83)

period from 2015 to 2017, with the evolution tends of certain policy direction; There were great differences in research direction and research scale between the foreign countries' arable land ecological risk assessment research and domestic research.

**Keywords:** cultivated land ecology; cultivated land risk; ecological risk assessment; CiteSpace

生态风险评价是一门新的学科领域,早期的生态风险评价主要针对人类健康,也就是人类健康风险评价。从20世纪80年代开始,由于社会经济的高速发展、人口数量的增长、城市化水平的不断推进,人类面临着越来越多的生态环境威胁。例如,在耕地利用过程中,人们对生活水平和生活质量的要求不断提高,必然导致更多物质和资源被消耗。为了获取更高的粮食产量和经济收益,大量地使用化肥和农药,导致耕地生态环境恶化、耕地非农化、耕地质量退化和耕地土壤污染等一系列问题。同时,在土地资源的开发过程中,出现了水土流失、土壤盐渍化、土地荒漠化、生物多样性破坏等环境问题,使得耕地生态系统遭受破坏,功能缺失,对整个自然生态环境系统产生不利的影响,甚至威胁人类的生存。因此,对耕地进行生态风险评价,并根据评价结果,对耕地生态风险进行判断,从而采取有效的保护措施,为人类活动对生态系统的影响提供预测,可以消除或降低生态风险,改善和保护耕地生态系统。生态风险评价作为一种重要的生态环境管理手段,其相关的研究和应用都得到了迅速的发展。耕地生态风险评价是近十几年来国内外学者关注的焦点和研究的热点,耕地生态风险评价是一个全新的研究领域,有待研究探讨的问题很多,如耕地生态风险评价指标体系如何确定?耕地生态风险评价的方法和模型有哪些?多风险源对耕地的生态效应如何表征和评价?

本文通过梳理现有的研究成果,综述了国内外耕地生态风险评价的研究进展,对其存在的问题和未来研究的方向进行分析与展望,有助于推动耕地生态风险评价的研究进一步深入。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

为了更加客观地描述国内外耕地生态风险评价的研究前沿,本研究以CNKI数据库和Web of Science (WOS)数据库中核心数据合集(包括SCI-EXPANDED、SSCI、A & HCI、CPCI-S、CPCI-SSH、ESCI、CCR-EXPANDED、IC)作为文献来源。在CNKI数据库中,检索条件:主题“耕地生态”或者主题“耕地并含风险评价”,为了获取相关度高和质量更好的文献,勾选

增强出版,检索跨度为2007年1月—2018年3月,共检索到306篇文献。在WOS核心数据库中,检索条件:主题“Cultivated land and ecological risk”或者主题“Arable land and ecological risk”或者主题“Cultivated land and risk assessment”或者主题“Arable land and risk assessment”,检索跨度为2000年1月—2018年3月,共检索到380篇文献,作为本研究的样本。

### 1.2 研究方法与工具

随着大数据时代的加速发展和互联网的广泛应用,学者们利用文献数据信息来绘制科学知识图谱,揭示科学知识的发展进程和结构关系,实现学科知识的可视化<sup>[1]</sup>。如何快速获取学术资源,掌握研究前沿、热点与发展脉络是大数据时代下学术研究者所面临的挑战。目前文献图谱软件有十几种,每个软件都有各自的优势<sup>[2]</sup>。国外较流行的信息可视化分析软件主要有Sci2、CiteSpace、Bibexcel、Gephi、VOSviewer、Vantage Point和Network Workbench Tool等,国内学者常用的信息可视化分析软件主要有:CiteSpace、Histcite和Pajek。Sci2可以用来构建多种网络矩阵,拥有强大的数据分析和处理能力;CiteSpace主要是对科学文献数据进行计量和分析,实现信息的可视化,通过对特定的文献数据集进行主题和关键词共现、文献共被引及时间序列等相关分析,用图形把分析结果展示出来,适用于作者合作、文献共被引、期刊Qoverlay分析和时间序列分析等;Bibexcel、Gephi、VOSviewer和Pajek可以结合起来使用,进行文献计量学分析、引文分析、聚类分析和科学知识图谱的绘制等;Vantage Point是一种文本挖掘软件,用来从专利和文化数据库的检索结果中发现知识;Network Workbench Tool可以提供特殊的算法来处理出版数据,从而构建和分析文献计量网络与地图;Pajek是用于研究目前所存在的各种复杂非线性网络的分析工具。与其他软件相比,CiteSpace更侧重于分析学科研究前沿的演变趋势,功能比较完善,可以突出显示核心项目。在WOS、CNKI等数据库的支持下,利用CiteSpace对某一研究领域进行文献可视化分析,已经成为国内外学者研究的热点。

因此,本文以耕地生态风险评价相关文献为研究对象,利用CiteSpace V软件对目标领域的主题、关键

词和WOS分类进行共现分析,将耕地生态风险评价研究领域的知识演化路径、研究内容和热点进行分析,进一步系统地梳理目标领域的研究文献,并绘制知识图谱。借助CiteSpace V工具来挖掘耕地生态风险评价的知识基础、发展脉络以及近期研究热点,是对耕地生态风险研究的一种新的尝试。

## 2 国外研究热点词聚类分析

### 2.1 研究结果

对于Web of Science数据库中检索到的380篇文章,在CiteSpace V软件的应用界面上,节点类型选择Cited Reference,时间间隔为1年,阈值选择以TOP=30为阈值,通过网络聚类分析,得到文献共引网络自动聚类标签视图(图1)。

运用CiteSpace V得到耕地生态风险研究的热点词聚类图,聚类#1的标题是农业灌溉土地(Agricultural irrigated soil)、聚类#2的标题是土壤退化(Soil degradation)、聚类#3的标题是地统计分析(Geostatistical analysis)、聚类#6的标题是土地利用(Land use)。从图1可以看出,2000—2018年的文献共引网络有比较明显的自然聚类,通过3篇关键文献使这四个聚类联系在一起。自动聚类标签视图是通过图谱聚类算法生成知识聚类,然后通过再次运算从引用聚类的相关施引文献中提取标题词,可以表明在一定知识基础中的研究前沿领域。最后结合自动聚类标签视图1,可以得到该研究领域的各个研究主题的信息表(表1)。

### 2.2 各个前沿主题分析

(1)农业灌溉土地(Agricultural irrigated soil)。据统计,全球至少有2000万hm<sup>2</sup>农田用经过处理和未处理的废水进行灌溉<sup>[3]</sup>。在供水受到限制的西班牙东南部地区,人们会用处理过的废水灌溉农业土壤,这种灌溉方式在半干旱地区比较常见<sup>[4]</sup>。虽然一定程度上可以改变土壤性质和质量,但由于技术上的限制,用处理过的废水灌溉农业土壤的做法并不是在许多地区都能实现。中国、德国和印度的一些学者分别

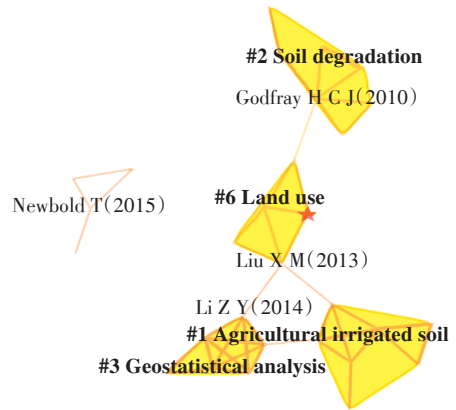


图1 耕地生态风险研究的热点词聚类图

Figure 1 The cluster diagram of hot words in the research field of cultivated land ecological risk

对所在地区的工业污水灌溉农田进行实验分析,发现用工业污水灌溉会导致农田上种植的农作物重金属超标<sup>[5-7]</sup>。而Trujillo-González等<sup>[8]</sup>分析了赤道气候下用潜在污染的河水灌溉土壤,并未发现土壤物理化学指标的变化。这一事实可能与气候因素(温度和降水)有关,因为气候因素可以快速降解有机物质、营养物质和污染物。针对受污染的水体,Yu等<sup>[9]</sup>在2017年的研究中发现DMPP是有效的硝化抑制剂,可以减轻农田向水体转化氮和重金属风险。因此,对有潜在污染的农业灌溉水质进行研究分析,找出污染源并采取相关措施,可以减少来自工业污水和生活污水等方面的危害,保护农田。由于各种人为因素的影响,耕地会受到各种污染物带来的环境威胁,导致耕地质量和数量下降,耕地生态风险受到各种风险因子的威胁。农业灌溉可以防止耕地受到水体污染的危害,因此在对耕地生态风险进行评价时,可以把水体污染纳入耕地生态风险因子中,综合考虑多种致险因子的共同作用。

(2)土壤退化(Soil degradation)。FAO定义土壤退化:“因土壤质量下降而不太适于某一特定目的(如作物生产)的过程。”Oldeman等<sup>[10-11]</sup>在“全球土壤退化

表1 耕地生态风险研究文献共被引网络聚类信息表

Table 1 The clustering information of cultivated land ecological risk research literature co-citation network

序号 Serial number	研究的前沿领域 Front research fields	首次出现时间 The initial publishing year	该领域具有代表性的文献 Representative literature in the field
#1	农业灌溉土地 Agricultural irrigated soil	2014	文献[8]
#2	土壤退化 Soil degradation	2012	文献[12]
#3	地统计分析 Geostatistical analysis	2011	文献[26]
#6	土地利用 Land use	2013	文献[35]

评估”(GLASOD)中将土壤退化描述为“人类引起的现象”,并将土壤退化程度按4个主要类型、4个等级和3种其他土地类型绘制出世界土壤退化状况地图。土壤退化会对粮食安全构成威胁,降低产量,迫使农民使用更多的投入品,并最终导致土壤被遗弃<sup>[12]</sup>。土壤健康和供水是农业生产的基石,没有水就没有农业。土壤侵蚀是导致土壤退化的一个严重问题,特别在热带和亚热带的发展中国家,由侵蚀造成的土壤质量和生育力下降现象普遍存在,最终导致粮食安全受到威胁<sup>[13-18]</sup>。此外,土壤退化降低食品生产数量和质量,是导致人类营养不良的一个间接原因,危害人类的健康<sup>[19]</sup>。在半干旱农业区,人类不合理活动是导致土壤严重退化的主要原因<sup>[20-22]</sup>,例如,集约耕作、土壤压实、以及采矿造成的土壤流失等,都忽视了保持土壤健康的重要性。在研究土壤退化的时空演变方面,国外学者已经有很丰富的技术基础。Dube等<sup>[23]</sup>使用Landsat系列数据分析了南非东开普省分散土壤环境中土壤退化的时空变化;Rayegani等<sup>[24]</sup>利用荒漠化潜力评估(IMDPA)和旱地土地退化评估(LADA)两种方法评估了建立土壤退化模型的遥感数据能力;Marchetti等<sup>[25]</sup>使用地统计学和地理信息系统方法评估意大利中部地区土壤退化状况的关键指标。土壤退化会影响耕地质量和粮食安全,而土壤是耕地生态系统的重要组成部分,人类不合理开发利用耕地资源所带来的土壤退化是耕地生态风险因子之一,因此研究土壤退化是耕地生态风险研究的前提。

(3)地统计分析(Geostatistical analysis)。从近年文献来看,基于地统计法和GIS技术相结合研究重金属污染的国内外成果颇丰。地统计分析也常用来研究土壤重金属污染的空间分布特性和污染程度评价。Liu等<sup>[26]</sup>基于多元地统计分析来评估重金属积累的空间分布,并确定其在烟草种植区土壤中的来源。Lado等<sup>[27]</sup>采用FOREGS地球化学数据库中的地质统计分析来评估欧洲土壤中的重金属。Yokoyama等<sup>[28]</sup>对爱尔兰某地区的土壤铅进行地质统计分析和危害评估,制作了一个可用于危害评估和决策支持的概率图。Atteia等<sup>[29]</sup>对瑞士的侏罗系土壤污染进行地统计分析,以确定其中微量金属的分布情况。Yost等<sup>[30]</sup>对大规模土地土壤化学性质进行地统计分析。Sun等<sup>[31]</sup>采用地统计学方法,研究中国亚热带山地土壤质量时空变化。Lu等<sup>[32]</sup>和Sun等<sup>[33]</sup>采用多元分析和地统计分析,确定农业土壤中重金属的空间分布和可能的来源,并且对土壤中重金属的含量和来源进行表征以确

定区域水平的质量评估标准。这些文献主要关注的是城市和矿区周边的土壤。由于农业土壤可能受到采矿和冶炼等工业活动的污染,因此识别农业土壤中重金属的来源可以控制或减少重金属向耕作土壤转移。地统计分析被广泛应用到农业土壤重金属污染研究中,可以分析重金属污染的空间分布和污染程度。由于人类的不合理活动,耕地生态系统难免会受到人为因素的影响,例如工矿企业不合理排放“三废”,产生的重金属会严重影响耕地质量。在研究耕地生态风险时,土壤重金属污染带来的生态风险是必须考虑在内的,而地统计分析恰好是评价土壤重金属污染程度的手段。因此在未来的耕地生态风险研究中,可以采用地统计分析来评价土壤重金属污染程度。

(4)土地利用(Land use)。由于对生态系统安全和人类健康的潜在威胁,土壤重金属污染受到密切关注。不同的土地利用方式下,由于土壤肥力、湿度、温度和质地等不同,耕地土壤重金属的空间分布及其环境风险也存在较大的差异。Liu等<sup>[34]</sup>基于GIS的方法研究不同土地利用类型下土壤重金属的空间分布特征,并采用多变量分析确定其可能的来源。Kumwimba等<sup>[35]</sup>从不同土地利用类型(耕种沟渠、荒芜沟渠、路边沟渠和居民沟渠)中采集样品,描述不同土地用途的沟渠沉积物中的金属/准金属状态。Zheng等<sup>[36]</sup>研究北京市不同土地利用类型的土壤Pb积累情况,结果表明绿地和果园中的Pb含量显著高于其他土地利用类型。Marzaioli等<sup>[37]</sup>研究发现意大利南部地中海地区的土壤质量与不同的土地利用类型有关,永久性作物管理通常对土壤质量产生强烈的负面影响。Nosrati<sup>[38]</sup>使用多元统计技术评估伊朗流域内三种不同土地利用/土壤侵蚀类别下的土壤质量指标。Wang等<sup>[39]</sup>对我国中高纬度的不同土地利用类型和土壤类型的非点源磷污染进行评估,结果表明不同土地利用类型的平均总磷负荷强度依次为水田>旱地>湿地>草地>林地。从以上的文献可以看出,在研究土壤重金属污染程度时,将土地利用考虑在内,有利于确定重金属浓度,同时,土地利用转型也可以使原有的土壤污染压力得到一定的缓解。目前国内土地利用生态风险评价的相关研究比耕地生态风险评价更加丰富,但是土地利用生态风险评价注重不同土地利用类型的风险评价,耕地生态风险评价更加深入地分析耕地生态系统,土地利用生态风险研究可以为耕地生态风险研究提供理论基础和技术参考。

### 2.3 国外研究进展评述

目前国外的耕地生态风险评价研究更多地关注耕地土壤方面,包括土壤灌溉、土壤退化和土壤重金属三个方面的评估。在农业灌溉土地方面,集中研究废水灌溉农田引起重金属污染的程度和空间分布。地统计分析和土地利用两个方面的主题是密切相关的,国外学者对不同土地利用类型的土壤重金属污染情况进行研究时,多数采用地统计分析和多元统计分析,一些学者也会采用地理信息系统与地统计分析相结合的方法。研究不同土地利用/土壤侵蚀类型下土壤重金属的累积特征,可以为土壤环境管理和土壤重金属污染防治提供参考依据。地统计分析为耕地土壤重金属评价提供基础的方法,可以为今后的研究提供技术支撑。

## 3 国内研究热点词聚类分析

### 3.1 研究结果

通过特定条件对CNKI数据库进行检索后,获得质量较好的306篇文章。在CiteSpace V软件的应用界面上,由于中英参考文献的引用格式差异,中文文献只能进行主题和关键词分析,所以节点类型选择Term和Keyword,时间间隔为2年,TOP N中设定N=30,也就是在每个Time slice中提取30个被引次数最高的文献。对所得文献数据进行初步的年度分布统计分析(图2),形成了耕地生态风险评价研究领域的初步认知。

从图2可以看出,在观察期(2007—2009年)内,国内对耕地生态风险评价的研究不多,表明耕地风险的研究还未被重视。2010—2017年耕地生态风险评价的文献数量稳步增长,特别在2015—2017年间发展迅猛,说明耕地生态风险问题引起了国内学者的广泛重视,成为重要的研究热点。由于2018年只统计1—3月出版的文献,所以文献数量较少。

通过统计发现,国内耕地生态风险评价研究的主题主要围绕“生态安全”“重金属”“生态足迹”“社会价值”和“耕地保护”五个方面展开,图3是可视化后得到的结果。

### 3.2 各个热点词聚类分析

(1)生态安全,包括PSR(压力-状况-响应)模型、耕地生态安全、耕地生态系统等关键词,主要聚焦在耕地生态安全评价方面。在耕地生态危机日益严峻的情况下,生态安全是耕地资源可持续利用研究的热点研究课题。开展耕地生态安全研究不仅可以认识

到耕地生态系统的重要性,完善生态系统的服务功能,在一定程度上对防止水土流失、保护耕地具有一定的现实意义。国内学者对耕地生态安全研究主要采用的模型:PSR概念模型、DPSIR模型、生态足迹模型和可拓优度评价模型等。很多学者采用PSR模型构建耕地生态安全评价指标体系,分别对某个地区的耕地生态安全进行定量分析和评价<sup>[40-44]</sup>。也有学者通过DPSIR模型建立耕地生态安全评价指标体系,运用层次分析法(AHP)和熵权法确定指标权重,对结果进行分级和时空分析<sup>[45-47]</sup>。赵先贵等<sup>[48]</sup>、赵文晖等<sup>[49]</sup>、白立佳等<sup>[50]</sup>在建立耕地生态安全评价指标体系基础上,运用改进的生态足迹模型对某地区的耕地生态安全进行了评价和时空分异研究,为评估耕地利用可持续发展状况提供了思路。赵文晖等<sup>[51]</sup>采用可拓优度评价模型对保定市的耕地生态安全进行评价。上述研究中,PSR模型是最常用的,它是由经济合作与发

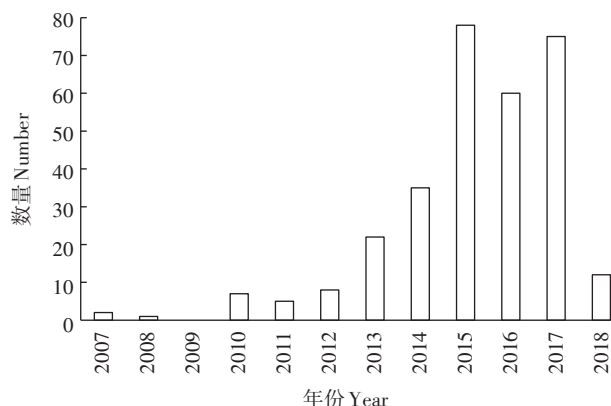


图2 耕地生态风险研究文献出版数量时间分布图

Figure 2 Time diagram of cultivated land ecological risk research literature quantity

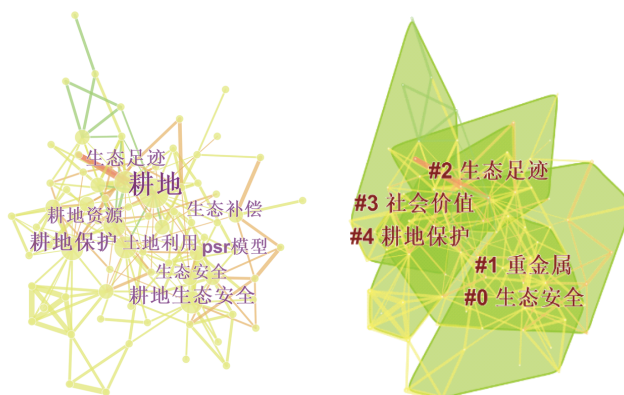


图3 聚类热点词网络结构视图

Figure 3 The cluster diagram of keywords in the research field of cultivated land ecological risk

展组织(OECD)提出用于系统的压力、状态、响应分析的模型,可以提供明确的思路、原则、方法和框架,为全面分析、解决环境或可持续发展问题提供支撑。国内多数学者通过PSR模型来建立耕地生态安全的评价指标体系,得到耕地生态安全综合评价指数,从而判断耕地生态安全等级。

(2)重金属,包括风险评价、生态风险、耕地土壤等关键词。在对耕地生态风险进行评价时,大多数国内学者针对耕地土壤的重金属含量进行分析,并根据污染的程度对生态风险等级进行分级。一些学者对矿区和锌冶炼区耕地土壤中主要的Pb、Cd、Zn和Cu元素进行取样调查,分析了耕地土壤重金属的空间分布和综合污染情况<sup>[52-55]</sup>。以北京市<sup>[56]</sup>、天津市<sup>[57]</sup>、东莞市<sup>[58]</sup>为研究区,对耕地土壤中主要重金属元素的时空变异和来源变化进行分析,可以发现工业、农业和城市化发展会导致土壤重金属含量的增加。综合国内耕地土壤重金属评价的相关文献发现,评价方法有:Hacanson潜在生态风险指数法、单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、优化赋权模糊综合评价法等。多数学者采用的评价方法并不是单独一种,而是两种或者三种结合起来运用<sup>[59-64]</sup>。

(3)生态足迹,包括耕地利用、可持续性、生态补偿等关键词。20世纪90年代,加拿大生态经济学家Ree和博士生Wackernagel提出了生态足迹模型,用来衡量一个国家或者地区可持续性发展状况<sup>[65]</sup>。由于模型计算结果直观清晰,区域可比性较强,引起国内外学者的关注,并且广泛应用。张志强等<sup>[66]</sup>于1999年将该模型引入中国,随后国内大量学者使用该模型对部分省、市的可持续发展状况进行评价。目前,国内一些学者已经开始将耕地的可持续利用和生态足迹联系起来进行研究。例如:刘秀丽等<sup>[67]</sup>测算了甘肃省在保持社会经济可持续发展下的最佳耕地资源容量,并对生态足迹和生态承载力进行预测;童悦<sup>[68]</sup>应用耕地生态足迹改进模型,分别在时间维度和空间维度上对浙江省的耕地可持续利用状况进行动态分析和空间差异分析;王琦等<sup>[69]</sup>采用传统生态足迹模型、改进生态足迹模型和EF-NPP模型三种模型,分析四川省耕地生态赤字等相关变化及趋势,并对三种模型的差异进行探讨。

(4)社会价值,包括生态服务价值、耕地资源、经济补偿等关键词。为正确认识和科学评估耕地资源的完全价值,国内已有一些学者对耕地资源的价值及评估方法进行了初步研究。谢宗棠等<sup>[70]</sup>、陈会广等<sup>[71]</sup>

和罗文<sup>[72]</sup>采用收益还原法分别对甘肃、山东和湖南三省耕地资源的市场价值进行了评估,但评估的只是耕地资源的经济产出价值。蔡银莺等<sup>[73]</sup>采用替代市场法对武汉市耕地资源的非市场价值(包括社会价值和生态价值)进行了评价。覃事娅等<sup>[74]</sup>根据耕地资源的不同价值构成,设计了耕地经济产出价值、生态服务价值和社会保障价值的市场化评估方法,并以湖南省为例进行了实证研究。刘婷婷<sup>[75]</sup>对成都市的耕地资源正外部性价值进行了定量评估。虽然我国执行世界上最严格的耕地保护制度,但还会出现耕地非农化的现象。这是由于片面认识耕地资源的价值,注重耕地的经济价值而忽略了耕地的粮食安全稳定功能、社会安定维护功能、生态服务功能、社会保障功能等生态社会价值。

(5)耕地保护,包括农用地保护、土地科学、占补平衡等关键词。对耕地进行生态风险评价,最终的目标是要根据评价结果,采取有效的措施控制消除或降低生态风险,改善和保护耕地生态系统,可以说耕地保护是耕地生态风险评价的最终目标。国内一些学者在耕地保护外部性的基础上,对耕地保护经济补偿的基本问题进行了界定分析,研究耕地保护补偿障碍因子的诊断方法,目的是探索合理的耕地补偿模式<sup>[76-80]</sup>。国内多数学者从粮食安全和生态安全的角度,对耕地保护的空間布局、整治和经济补偿分区方面进行了研究与探讨,并取得了一定成果。例如:曹瑞芬等<sup>[81]</sup>通过对比分析补偿分区结果与湖北省出台的主体功能区划方案,探讨主体功能区划框架下耕地保护经济补偿分区的分布规律。张贵军等<sup>[82]</sup>构建了县域耕地资源安全评价框架体系,根据不安全评价结果图划出综合工程整治区、肥力提升区、退耕区。奉婷等<sup>[83]</sup>通过分析各类型耕地综合质量特征,整理得到平谷区基本农田划定时空配置方案。

### 3.3 国内研究进展评述

通过知识图谱和相关文献分析可知:国内耕地生态风险评价研究的热点主题分布较广,但是每个主题之间的联系十分紧密,而生态安全是最主要的热点主题,这是因为生态安全为生态风险评价提供理论基础。生态安全的研究主要是采用PSR概念模型、DPSIR模型、生态足迹模型和可拓优度评价模型等,从而判断耕地生态安全等级。重金属的研究侧重于对土壤主要的重金属元素进行取样调查,国内学者常常会采用两种或三种评价方法综合起来对重金属污染进行评价。生态足迹的研究与耕地的可持续利用

紧密结合,而且多数学者会根据研究目的对原有的生态足迹模型进行改进。社会价值的研究是为了正确认识和科学评估耕地资源的经济价值、生态价值和社会价值。耕地保护的研究是对耕地生态风险评价结果的应用,根据评价结果可以制定耕地保护的有效可行措施,从生态安全角度对耕地质量、土壤重金属污染等进行风险评价,最后根据评价结果对耕地进行预警和保护,达到生态风险评价的目标。国内耕地生态风险评价在研究模型、评价方法和指标体系建立方面都已具备良好的基础,但是对比国外的研究,缺乏对耕地的风险源分析、受体评价、暴露评价、危害评价和风险表征等方面的详细研究。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

本文借助 CiteSpace V 软件对国内外耕地生态风险评价的相关文献数据进行分析,从宏观层面对该领域的知识演变、发展脉络以及近期研究热点进行较深入的分析,识别出研究领域内前沿主题的演化趋势。

(1)2000—2018年国外关于耕地生态风险评价的研究主题比较分散,包括“农业灌溉土壤”“土壤退化”“地统计分析”和“土地利用”四大聚类。四个主题之间都有作为研究基础的关键节点文献,但总体上该领域的研究主题还是比较分散,表明耕地生态风险评价在国外是个新兴的研究领域,很大程度上依赖于案例研究和理论方法研究。尽管如此,通过研究国外该领域的发展脉络,可为未来耕地生态风险研究的发展打下稳固的基础。

(2)国内耕地生态风险评价的相关研究在2007年以后才开始出现。2015—2017年该领域的学科研究进入活跃期,产生了很多具有重要影响力的文献,涌现了“生态安全”“重金属”“生态足迹”“社会价值”和“耕地保护”等前沿主题,这也表明国内该领域的研究方向从宏观角度转向社会实践,有关耕地资源的一系列重大生态问题激发了国内学者的研究兴趣。从“重金属”到“耕地保护”的研究主题演化趋势可以看出,国内该领域热点研究主题具有较明显的政策指向性,热点主题的出现往往伴随着国家政策的出台和落实。

(3)相较而言,国外的耕地生态风险评价研究与国内的研究在方向和尺度上有很大的差异。国外的相关研究集中在耕地土壤重金属的分析与评估上,注重耕地土壤污染对耕地生态系统脆弱性的影响;而国

内的相关研究主题较广,研究前沿有多方面的探索及深入的拓展,研究从“生态安全”演变到“耕地保护”层面,反映了国内耕地资源问题的现状,具有一定的地域性。

### 4.2 展望

(1)今后应在耕地生态风险的评价方法、评价指标和评价模型等方面开展更为深入的研究,进一步综合多种评价方法和评价模型应用研究,可以通过某区域的实证案例研究,加强耕地生态风险评价理论基础的实证检验和实际应用。

(2)未来的耕地生态风险评价研究应该注意紧跟国家耕地保护相关政策的总体要求,同时,该领域的研究在一定条件下可以适度地超前于国家政策,进一步加强耕地生态风险评价研究理论与实践创新。

### 参考文献:

- [1] 胡泽文,孙建军,武夷山. 国内知识图谱应用研究综述[J]. 图书情报工作, 2013, 57(3):131-137.  
HU Ze-wen, SUN Jian-jun, WU Yi-shan. Research review on application of knowledge mapping in China[J]. *Library and Information Service*, 2013, 57(3):131-137.
- [2] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2):242-253.  
CHEN Yue, CHEN Chao-mei, LIU Ze-yuan, et al. The methodology function of CiteSpace mapping knowledge domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2):242-253.
- [3] Corcoran E, Nellemann C, Baker E, et al. Sick water? The central role of wastewater management in sustainable development[R]. Norway: United Nations Environment Programme, 2010: 9-12.
- [4] Igwe C, Akamigbo F O R, Mbagwu J S C. Application of soil quality indices to assess the status of agricultural soils irrigated with treated wastewaters[J]. *Solid Earth*, 2013, 4(2):119-127.
- [5] Tao S, Cui Y H, Cao J, et al. Determination of PAHs in wastewater irrigated agricultural soil using accelerated solvent extraction[J]. *Journal of Environmental Science & Health Part B*, 2002, 37(2):141-150.
- [6] Tiwari K K, Singh N K, Patel M P, et al. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2011, 74(6):1670-1677.
- [7] Ansari M I, Malik A. Biosorption of nickel and cadmium by metal resistant bacterial isolates from agricultural soil irrigated with industrial wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2007, 98(16):3149-3153.
- [8] Trujillo-González J M, Mahecha-Pulido J D, Torres-Mora M A, et al. Impact of potentially contaminated river water on agricultural irrigated soils in an equatorial climate[J]. *Agriculture*, 2017, 7(7):52.
- [9] Yu Q, Ma J, Sun W, et al. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on heavy metals and inorganic nitrogen transformation in the rice field surface water[J]. *Water, Air, & Soil Pol-*

- lution, 2017, 228(4):162.
- [10] Oldeman L R, Lynden G W J V, Lal R, et al. Revisiting the Glasod methodology[R]. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre(ISRIC), 1996.
- [11] Oldeman L R, Hakkeling R T A, Sombroek W G. World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note[R]. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), 1991.
- [12] Gomiero T. Soil degradation, land scarcity and food security: Reriewing a complex challenge[J]. *Sustainability*, 2016, 8(3):281.
- [13] Khaledian Y, Kiani F, Ebrahimi S, et al. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1):128-141.
- [14] Lal R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability[J]. *Soil & Tillage Research*, 1993, 27(1/2/3/4):1-8.
- [15] Scherr S J. Soil degradation: A threat to developing-country food security by 2020? [R]. Washington D C: International Food Policy Research Institute, 1999:10-43.
- [16] Kishk M A. Conceptual issues in dealing with land degradation/conservation problems in developing countries[J]. *Geojournal*, 1990, 20(3):187-190.
- [17] Tittone P. Soil fertility and the role of soils for food security in developing countries[C]/Vienna: EGU General Assembly Conference, 2015.
- [18] Lal R. Soil degradation by erosion[J]. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(6):519-539.
- [19] Lal R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition[J]. *Food Security*, 2009, 1(1):45-57.
- [20] Wu R. Effect of Land use on soil degradation in alpine grassland soil, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5):1648-1655.
- [21] Zika M, Erb K H. The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in drylands[J]. *Ecological Economics*, 2017, 69(2):310-318.
- [22] Wen Z Z, Hong L X, Zhi M L, et al. Soil degradation and restoration as affected by land use change in the semiarid Bashang area, northern China[J]. *Catena*, 2005, 59(2):173-186.
- [23] Dube T, Mutanga O, Sibanda M, et al. Use of Landsat series data to analyse the spatial and temporal variations of land degradation in a dispersive soil environment: A case of King Sabata Dalindyebo local municipality in the Eastern Cape Province, South Africa[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2017, 100:112-120.
- [24] Rayegani B, Barati S, Sohrabi T A, et al. Remotely sensed data capacities to assess soil degradation[J]. *Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Science*, 2016, 19(2):207-222.
- [25] Marchetti A, Piccini C, Francaviglia R, et al. Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: A key indicator to assess soil degradation status in central Italy[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(2):230-242.
- [26] Liu H, Zhang Y, Zhou X, et al. Source identification and spatial distribution of heavy metals in tobacco-growing soils in Shandong Province of China with multivariate and geostatistical analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6):5964-5975.
- [27] Lado L R, Hengl T, Reuter H I. Heavy metals in European soils: A geostatistical analysis of the FOREGS geochemical database[J]. *Geoderma*, 2008, 148(2):189-199.
- [28] Yokoyama Y, Dhanabal M, Griffioen A W, et al. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in silvermines area, Ireland[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 127(2):239-248.
- [29] Atteia O, Dubois J P, Webster R. Geostatistical analysis of soil contamination in the Swiss Jura[J]. *Environmental Pollution*, 1994, 86(3):315-327.
- [30] Yost R S, Uehara G, Fox R L. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas II. Kriging 1[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(5):1033-1037.
- [31] Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2003, 115(1):85-99.
- [32] Lu A, Wang J, Qin X, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 425(1):66-74.
- [33] Sun C, Liu J, Wang Y, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and sources of heavy metals in agricultural soil in Dehui, northeast China[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(5):517-523.
- [34] Liu B, Ma X, Ai S, et al. Spatial distribution and source identification of heavy metals in soils under different land uses in a sewage irrigation region, northwest China[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16(5):1547-1556.
- [35] Kumwimba M N, Zhu B, Wang T, et al. Distribution and risk assessment of metals and arsenic contamination in man-made ditch sediments with different land use types[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(24):1-16.
- [36] Zheng Y, Chen T, Huang C, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 9(5):791-797.
- [37] Marzaioli R, D'Ascoli R, Pascale R A D, et al. Soil quality in a Mediterranean area of southern Italy as related to different land use types [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(3):205-212.
- [38] Nosrati K. Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(4):2895-2907.
- [39] Wang Z, Yang S, Zhao C, et al. Assessment of non-point source total phosphorus pollution from different land use and soil types in a mid-high latitude region of China[J]. *Water*, 2016, 2016(8):505.
- [40] 张锐, 刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(7):945-951.
- ZHANG Rui, LIU You-zhao. Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and diagnosis of its obstacle indicators in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(7):945-951.
- [41] 范胜龙, 杨玉珍, 陈训争, 等. 基于PSR和无偏GM(1,1)模型的福



- 建省耕地生态安全评价与预测[J]. 中国土地科学, 2016, 30(9): 19-27.
- FAN Sheng-long, YANG Yu-zhen, CHEN Xun-zheng, et al. Evaluation and prediction of the cultivated land ecological security in Fujian Province based on PSR and unbiased GM(1, 1) model[J]. *China Land Sciences*, 2016, 30(9): 19-27.
- [42] 郭荣中, 杨敏华, 申海建. 长株潭地区耕地生态安全评价研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 193-201.
- GUO Rong-zhong, YANG Min-hua, SHEN Hai-jian. Evaluation for ecological security of cultivated land in Chang-Zhu-Tan region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 193-201.
- [43] 张冰洁, 宋 戈. 松嫩高平原黑土区典型地域耕地生态安全评价及驱动力分析——以黑龙江省绥化市为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 215-220.
- ZHANG Bing-jie, Song Ge. Evaluation on cultivated land ecological security and analysis on the driving forces of the typical mollisols area in Songnen high plain: A case study of Suihua City in Heilongjiang Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3): 215-220.
- [44] 刘亚男, 李淑杰, 黄烁秋. 基于PSR和改进熵值法的县域耕地生态安全评价研究[J]. 江西农业学报, 2017, 29(8): 114-118.
- LIU Ya-nan, LI Shu-jie, HUANG Shuo-qiu. Ecological security assessment of county-scale cultivated land based on PSR and improved entropy method[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29(8): 114-118.
- [45] 吴大放, 梁达维, 姚漪颖, 等. 中尺度地域耕地生态安全评价分析——以珠海市为例[C]//中国土地资源开发整治与新型城镇化建设研究. 北京: 中国自然资源学会土地资源研究专业委员会, 2015: 516-523.
- WU Da-fang, LIANG Da-wei, YAO Yi-ying, et al. Cultivated land ecological security evaluation and analysis in a middle size area: A case study of Zhuhai[C]//China land resources development and renovation and new urbanization construction research. Beijing: Professional Committee on Land Resources Research of China Natural Resources Society, 2015: 516-523.
- [46] 王连超, 赵鹏飞. 2001—2013年河南省耕地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(21): 192-195.
- WANG Lian-chao, ZHAO Peng-fei. DPSIR-based evaluation on ecological security of cultivated land in Henan Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(21): 192-195.
- [47] 罗 毅. 湖北省耕地生态安全评价及时空演变研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014: 18-25.
- LUO Yi. Researches on ecological security evaluation and spatio-temporal variation characteristic of cultivated land in Hubei Province[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2014: 18-25.
- [48] 赵先贵, 马彩虹, 兰叶霞, 等. 陕西省2002年生态足迹分析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 217-220.
- ZHAO Xian-gui, MA Cai-hong, LAN Ye-xia, et al. Analysis on ecological footprint of Shaanxi Province in 2002[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 217-220.
- [49] 赵文晖, 宁雅楠, 杨伟州, 等. 基于改进生态足迹模型的保定市耕地生态安全时空变异分析[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 796-802.
- ZHAO Wen-hui, NING Ya-nan, YANG Wei-zhou, et al. Analysis on spatial-temporal variation of the ecological security levels of cultivated land in Baoding City based on improved ecological footprint model [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4): 796-802.
- [50] 白立佳, 李新旺, 门明新. 基于改进生态足迹模型的耕地可持续利用研究——以怀来县为例[J]. 生态经济(学术版), 2012(1): 6-11.
- BAI Li-jia, LI Xin-wang, MEN Ming-xin. Study on sustainable utilization of cultivated land resources based on improved ecological footprint model: A case of Huailai County[J]. *Ecological Economy (Academic Edition)*, 2012(1): 6-11.
- [51] 赵文晖, 杨伟州, 王利香, 等. 基于可拓优度评价模型的耕地生态安全评价——以保定市为例[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 60-65.
- ZHAO Wen-hui, YANG Wei-zhou, WANG Li-xiang, et al. Assessment on cultivated land eco-security based on extension superiority evaluation model: A case study of Baoding City[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(2): 60-65.
- [52] 胡 森, 吴家强, 彭佩钦, 等. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 423-430.
- HU Miao, WU Jia-qiang, PENG Pei-qin, et al. Assessment model of heavy metal pollution for arable soils and a case study in a mining area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 423-430.
- [53] 陈 凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4360-4369.
- CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, et al. Heavy metal contamination of soil and crops near a zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4360-4369.
- [54] 王卫华, 雷龙海. 毛坪铅锌矿区农耕地土壤重金属空间分布、污染与生态评估[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(11): 979-989.
- WANG Wei-hua, LEI Long-hai. Spatial distribution, contamination and potential ecological risk evaluation of heavy metals in farmlands around Maoping lead-zinc mining area[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2016, 34(11): 979-989.
- [55] 曹雪莹, 张莎娜, 谭长银, 等. 中南大型有色金属冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(1): 94-99.
- CAO Xue-ying, ZHANG Sha-na, TAN Chang-yin, et al. Heavy metal contamination characteristics in soils around a nonferrous metal smelter in central southern China[J]. *Soils*, 2015, 47(1): 94-99.
- [56] 王彬武, 李 红, 蒋红群, 等. 北京市耕地土壤重金属时空变化特征初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1335-1344.
- WANG Bin-wu, LI Hong, JIANG Hong-qun, et al. Spatio-temporal variation of soil heavy metals in agricultural land in Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1335-1344.
- [57] 陈宗娟, 张 倩, 邵超峰, 等. 乡镇企业密集区耕地土壤重金属时空变化特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016(5): 145-150.
- CHEN Zong-juan, ZHANG Qian, SHAO Chao-feng, et al. Spatial and temporal variation characteristics of heavy metals in arable soil in a township enterprises gathering area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016(5): 145-150.
- [58] 邱孟龙, 李芳柏, 王 琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属

- 时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2):298-305.
- QIU Meng-long, LI Fang-bai, WANG Qi, et al. Spatio-temporal variation and source changes of heavy metals in cultivated soils in industrial developed urban areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2):298-305.
- [59] 周俊驰, 铁柏清, 刘孝利, 等. 湖南矿区县域耕地重金属污染空间特征及潜在风险评价[J]. 湖南农业科学, 2017(4):75-79.
- ZHOU Jun-chi, TIE Bai-qing, LIU Xiao-li, et al. Spatial characteristics and potential risk assessment of heavy metal pollution in farmland in Hunan mining area[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017(4):75-79.
- [60] 高安勤, 何 娇, 何冠帝, 等. 贵州土地整治项目区耕地土壤重金属含量特征及评价——以六枝特区岩脚镇为例[J]. 广东农业科学, 2016, 43(11):70-77.
- GAO An-qin, HE Jiao, HE Guan-di, et al. Characteristics and contamination evaluation on cultivated soil heavy metals in consolidation project areas in Guizhou Province: A case study on Yanjiao Town in Liuzhi District[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(11):70-77.
- [61] 马芊红, 张光辉, 耿 韧, 等. 我国水蚀区坡耕地土壤重金属空间分布及其污染评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2):112-118.
- MA Qian-hong, ZHANG Guang-hui, GENG Ren, et al. Soil heavy metal spatial distribution and pollution assessment of farmland in the water erosion zone of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2):112-118.
- [62] 巩万合, 王志强, 阚建鸾. 长三角典型农业区耕地土壤重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(23):4494-4518.
- GONG Wan-he, WANG Zhi-qiang, KAN Jian-luan. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment of cultivated soil in the typical agricultural region of Yangtze River Delta[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(23):4494-4518.
- [63] 邱孟龙, 王 琦, 刘黎明, 等. 优化赋权模糊综合评价法对耕地土壤重金属污染的风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(11):1049-1056.
- QIU Meng-long, WANG Qi, LIU Li-ming, et al. Risk assessment of farmland soil heavy metal pollution using modified empowered fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(11):1049-1056.
- [64] 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆县耕地土壤重金属垂直分布特征与污染风险[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2):368-373.
- Ajiguli·Mamuti, Maimaitituexun·Aizezi, Ainiwar·Maimaiti. Vertical distribution characteristics and risk assessment of soil heavy metal contamination of farmlands in Yanqi County, Xinjiang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2):368-373.
- [65] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1):3-24.
- [66] 张志强, 徐中民. 中国西部12省(区市)的生态足迹[J]. 地理学报, 2001, 16(5):599-610.
- ZHANG Zhi-qiang, XU Zhong-min. The ecological footprints of the 12 provinces of west China in 1999[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 16(5):599-610.
- [67] 刘秀丽, 张 勃, 咎国江, 等. 基于生态足迹的甘肃省耕地资源可持续利用与情景预测[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1):84-91.
- LIU Xiu-li, ZHANG Bo, ZAN Guo-jiang, et al. Sustainable use and scenario prediction of cultivated land in Gansu Province based on ecological footprint theory[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(1):84-91.
- [68] 童 悦. 基于能值-生态足迹改进模型的浙江省耕地可持续利用研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015:15-30.
- TONG Yue. Study on sustainable utilization of cultivated land in Zhejiang Province through the modified energy-based footprint model[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015:15-30.
- [69] 王 琦, 易桂花, 张廷斌, 等. 基于生态足迹模型的四川省耕地资源评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1):81-83.
- WANG Qi, YI Gui-hua, ZHANG Ting-bin, et al. Evaluation of cultivated land resources in Sichuan Province based on ecological footprint model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(1):81-83.
- [70] 谢宗棠, 王生林, 杨慧敏, 等. 甘肃省耕地资源价值的测算[J]. 开发研究, 2006(3):99-102.
- XIE Zong-tang, WANG Sheng-lin, YANG Hui-min, et al. Measurement of the value of cultivated land resources in Gansu Province[J]. *Research on Development*, 2006(3):99-102.
- [71] 陈会广, 曲福田, 陈江龙. 山东省耕地资源价值评估研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(1):25-30.
- CHEN Hui-guang, QU Fu-tian, CHEN Jiang-long. On value accounting of arable land in Shandong Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2003, 13(1):25-30.
- [72] 罗 文. 湖南省耕地资源价值核算与利用对策研究[J]. 衡阳师范学院学报, 2005, 26(4):118-121.
- LUO Wen. The land resource value in Hunan Province is appraise and utilize[J]. *Journal of Hengyang Normal University*, 2005, 26(4):118-121.
- [73] 蔡银莺, 李晓云, 张安录. 耕地资源非市场价值评估初探[J]. 生态经济, 2006(10):10-14.
- CAI Yin-ying, LI Xiao-yun, ZHANG An-lu. The application of contingent value method in non-market value of cultivated land resources [J]. *Ecological Economy*, 2006(10):10-14.
- [74] 覃事娅, 尹惠斌, 熊 鹰. 基于不同价值构成的耕地资源价值评估——以湖南省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(4):466.
- QIN Shi-ya, YIN Hui-bin, XIONG Ying. Arable land valuation based on different kinds of values: A case study of Hunan Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(4):466.
- [75] 刘婷婷. 基于外部性理论的成都市耕地资源价值测算[J]. 河南城建学院学报, 2015, 24(3):64-69.
- LIU Ting-ting. Positive externalities value farmland resources estimate of Chengdu[J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2015, 24(3):64-69.
- [76] 牛海鹏, 张 杰, 张安录. 耕地保护经济补偿的基本问题分析及其政策路径[J]. 资源科学, 2014, 36(3):427-437.
- NIU Hai-peng, ZHANG Jie, ZHANG An-lu. Basic problems analysis

- and policy path of the cultivated land protection economic compensation[J]. *Resources Science*, 2014, 36(3):427-437.
- [77] 余亮亮, 蔡银莺. 基于农户满意度的耕地保护经济补偿政策绩效评价及障碍因子诊断[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7):1092-1103.  
YU Liang-liang, CAI Yin-ying. Performance evaluation and obstacle indicator diagnoses of economic compensation for farmland protection policy based on farmers' satisfaction[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(7):1092-1103.
- [78] 雍新琴, 舒帮荣, 陈龙高, 等. 耕地保护县域补偿机制研究[J]. 资源科学, 2013, 35(9):137-144.  
YONG Xin-qin, SHU Bang-rong, CHEN Long-gao, et al. Mechanisms of county-level compensation for cultivated land protection[J]. *Resources Science*, 2013, 35(9):137-144.
- [79] 姜广辉, 孔祥斌, 张凤荣, 等. 耕地保护经济补偿机制分析[J]. 中国土地科学, 2009, 23(7):24-27.  
JIANG Guang-hui, KONG Xiang-bin, ZHANG Feng-rong, et al. Analyzing the mechanism of economic compensation for farmland protection[J]. *China Land Science*, 2009, 23(7):24-27.
- [80] 雍新琴, 张安录. 基于粮食安全的耕地保护补偿标准探讨[J]. 资源科学, 2012, 34(4):749-757.  
YONG Xin-qin, ZHANG An-lu. Discussion on compensation standard of the arable land protection based on food security[J]. *Resources Science*, 2012, 34(4):749-757.
- [81] 曹瑞芬, 张安录. 主体功能区划框架下耕地保护经济补偿分区——以湖北省为例[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2014, 33(4):98-104.  
CAO Rui-fen, ZHANG An-lu. Zoning of economic compensation for cultivated land protection under framework of main function zones: A case study in Hubei Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University(Social Science Edition)*, 2014, 33(4):98-104.
- [82] 张贵军, 赵丽, 张蓬涛, 等. 基于农用地分等的耕地资源安全评价及整治分区[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16):248-255.  
ZHANG Gui-jun, ZHAO Li, ZHANG Peng-tao, et al. Cultivated land resource security evaluation and consolidation division based on farmland classification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16):248-255.
- [83] 奉婷, 张凤荣, 李灿, 等. 基于耕地质量综合评价的县域基本农田空间布局[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1):200-210.  
FENG Ting, ZHANG Feng-rong, LI Can, et al. Spatial distribution of prime farmland based on cultivated land quality comprehensive evaluation at county scale[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(1):200-210.