

耕地生态安全评价研究展望*

吴大放¹ 刘艳艳^{2**} 刘毅华¹ 姚漪颖¹ 梁达维¹

(1. 广州大学地理科学学院 广州 510006; 2. 广州市民用建筑科研设计院 广州 510055)

摘要 本文采用文献资料法和对比法从耕地生态安全研究阶段、概念、特征、驱动因素、评价尺度、评价方法与技术、评价指标体系、模拟预测、保护措施等方面对国内外耕地生态安全评价的主要研究成果进行系统的总结、对比和分析。研究表明:耕地生态安全研究经历了区域生态安全格局构建的初始研究阶段、生态环境评价研究的发展研究阶段、耕地生态安全评价研究的崭新阶段,并逐渐成为研究的难点与热点;耕地生态安全概念初步建立,耕地生态安全评价刚刚起步,中尺度综合研究与科学合理的评价指标体系相对缺乏,现有研究多侧重于现状分析,缺乏动态变化和模拟研究,难以从整体上把握区域耕地生态安全时空演变规律与机理。因此,今后开展耕地生态安全评价与模拟研究十分迫切,对于完善耕地资源安全研究具有重要的理论意义,可为控制未来耕地规模减少以及保护耕地生态环境,编制土地利用总体规划提供科学依据。

关键词 耕地生态安全 概念 评价指标体系 评价尺度 评价方法 模拟预测 时空演变
中图分类号: F301.21 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)03-0257-11

Progress on ecological security evaluation of cultivated land

WU Dafang¹, LIU Yanyan², LIU Yihua¹, YAO Yiyang¹, LIANG Dawei¹

(1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;
2. Civil Architecture Science Research and Design Institute of Guangzhou, Guangzhou 510055, China)

Abstract The research progresses on studies phases, concept, characteristics, driving factors of ecological security of cultivated land were summarized in the paper. The paper also systematically discussed the evaluation scale, method and technology, index system, as well as simulation and forecast, protection measures of ecological security of cultivated land through literatures review. The main previous research results were also compared and analyzed. The ecological security of cultivated land had experienced the primary stage of construction, the development stage of evaluation, the new stage of evaluation, and it had been becoming an important and hot topic in the corresponding research fields. The concept of ecological security of cultivated land had been set up, and cultivated land ecological security evaluation just started. The existing researches were mainly focused on analysis of current situation of cultivated land ecological security, the comprehensive researches on mesoscale, scientific and rational evaluation index system, dynamic change and simulation studies were still relatively lack. Consequently, it is difficult to comprehensively understand the spatio-temporal evolution and mechanism of cultivated land ecological security. As a conclusion, the future researches should focus on the integrated evaluation and simulation of cultivated land ecological security with spatial-temporal changing characteristic from multi-scales. The results would play a great significance role on the theory of cultivated land ecological security research. They also would benefit cultivated land protection and area reduction control, and design of land utilization plan.

Keywords Cultivated land ecological security; Concept; Evaluation index system; Evaluation scale; Evaluation method; Model simulation; Spatial-temporal evolution

(Received Aug. 10, 2014; accepted Dec. 24, 2014)

* 国家自然科学基金项目(41101078)、广东省自然科学基金项目(S2013010014526)、教育部人文社会科学研究一般项目(13YJA790074, 14YJA630083)、广东省教育厅特色创新项目(耕地生态安全评价模拟与多功能保护研究)、广州市属高校科研计划一般项目(2012A014)、广东省教育科研“十二五”规划 2013 年度研究项目(2013JK134)、广州市教育科学“十二五”规划(第 2 批)课题(12A037)、2014 年度广东省教育厅省级大学生创新训练项目(201411078056, 201411078057)资助

** 通讯作者: 刘艳艳, 研究方向为土地资源开发利用与保护。E-mail: sunnylyy08@163.com
吴大放, 研究方向为土地资源开发利用与保护。E-mail: wudaf2004@163.com

收稿日期: 2014-08-10 接受日期: 2014-12-24

保障耕地资源数量、质量和生态安全是耕地资源安全研究的重要内容,其中耕地数量安全是客观物质基础,耕地质量安全是生产力的根本保障,生态安全是耕地安全的基本要求。现有研究表明有关耕地数量、质量安全的研究较多,最基础的耕地生态安全研究较少,因此,探讨耕地生态安全评价研究,不仅有利于协调人地矛盾,保障粮食安全和社会稳定,而且对实现区域生态环境保护和社会经济可持续发展,构建和谐社会具有重要的理论和现实意义^[1]。耕地生态安全是指耕地资源环境、生态系统和社会经济的安全,是相对于生态威胁的一种功能状态。国外学者对耕地生态安全的研究主要是把耕地生态安全与不同区域土地生态安全及土地可持续利用紧密结合,开展系统分析^[2-3];我国学者较多地关注土地生态安全研究,研究对象主要为不同尺度和不同类型的土地,如全国、省、市、区、流域和城市、草原、湿地等^[4-14],单独研究耕地生态安全的成果较少,研究内容集中在耕地生态安全的概念与内涵辨析^[1,8,15-16],如何选择评价指标、构建评价指标体系^[7,17],开展生态安全现状评价与格局分析^[1,17-18]等方面。如今,耕地生态安全的基本概念还存在一定争议,耕地生态安全评价刚刚起步,尚未建立统一的评价指标体系和评价方法,更缺乏中尺度、空间化、多因素和动态的耕地生态安全评价和模拟系统^[14,19-21]。因此,加强耕地生态安全评价研究,是今后开展耕地生态安全研究的基础和核心,对于丰富完善耕地安全研究具有重要的理论意义,同时可为合理利用与保护耕地资源,协调生态系统健康发展及实现区域可持续发展提供决策支持。

改革开放以来,伴随着工业化和城镇化进程的不断加快,我国耕地数量锐减,耕地质量不断下降,耕地污染不断加剧,耕地生态环境状况急剧恶化,这不仅影响粮食安全和社会稳定,而且人类的生存环境也受到威胁。温家宝总理在建立国土资源部初期指出,“发达国家管理保护土地资源,已经跨过了数量管护、质量管护两个阶段,正向生态环境管护的更高层次发展,而我国的耕地数量管护还处在初级阶段”。耕地生态环境变劣,不仅造成耕地数量的直接损失,还会造成耕地质量下降的隐性损失^[6],如何保护现有耕地资源,防止耕地生态环境再次受到污染和破坏,加强耕地资源生态安全评价与模拟研究,成为人民群众普遍关注和各级政府迫切需要解决的科学问题,耕地生态安全成为当前耕地资源安全研究的前沿课题。2011年9月,温家宝总理在考

察国土资源部时提出,“要充分认识资源是数量、质量和生态三者的有机统一,在做好数量管护的同时,加强质量管理和生态管护”。基于以上原因考虑,本研究拟对耕地生态安全概念进行界定,对耕地生态安全主要研究内容的研究进展进行回顾与总结,并对今后开展耕地生态安全研究的方向进行展望。

1 国内外研究现状及发展动态分析

目前,国内外学者已经初步开展了有关耕地生态安全的研究,为耕地资源生态安全评价与模拟研究奠定了良好的基础。

1.1 耕地生态安全研究的发展阶段

生态安全是属于自然科学与社会科学的交叉学科,目前国际上尚无公认的关于生态安全的定义^[15]。国内外学者认为生态安全有广义和狭义两种理解:其中广义的生态安全定义为在人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会秩序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态,包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全,组成一个复合人工生态安全系统;狭义的生态安全定义为自然和半自然生态系统的安全,即生态系统完整性和健康的整体水平反映^[15-16]。生态系统健康是环境管理的一个新方向,一般认为,健康系统是功能正常的生态系统,是稳定和可持续的系统,它能维持自身组织结构和自治,以及保持对胁迫的恢复力。不健康的生态系统就是功能不完全或不正常的生态系统,它的安全状况处于受胁迫之中。

国外开展相关研究主要集中在生态健康风险评价和生态风险评价方面,具备了较为完善的概念、评价体系和评价方法,可以视为与生态安全评价研究相关,但是目前单独以耕地生态安全为对象进行研究的较少。我国耕地生态安全研究大致经历了3个发展阶段。我国对生态安全问题的研究从20世纪90年代起步,但在1998年“三江”特大洪灾、2000年北方沙尘暴等发生后,我国逐步加强对生态安全问题的关注^[19]。这一时期,俞孔坚等^[16,19-20,22-27]专家学者先后开展了有关区域生态安全格局构建的研究,可视为初始研究阶段。随着研究的不断深入,彭补拙等^[28-38]专家学者先后在生态环境评价方面做了大量的基础研究,构建了评价指标体系,并进行了实证分析,可视为发展研究阶段。目前,随着人们对耕地生态环境的日益重视,单独以耕地资源安全为研究对象的研究开始出现^[39],并与此对应开展了一系列的耕地生态安全评价^[11-14]和模拟预测^[40]研究,可视为崭新研究阶段。

1.2 国外研究现状

由于“生态安全”这一概念出现在 20 世纪 80 年代末,许多国外学者在学术层面上的探讨并不多,前期研究主要集中在生态安全的概念辨析、理念形成和对国家、民族发展的重要意义等方面^[41]。国外早期对生态安全的研究源于生态系统健康评价研究,1941 年有关学者提出了土地健康的有关概念与内涵,并将其应用于土地功能状况的评价与分析,自此有关土地生态系统和环境安全问题的研究逐步得到发展起来^[16]。1977 年,美国著名环境学家最早将环境变化含义明确引入安全概念,对国家安全的概念进行了重新界定,并指出“目前对安全的威胁,来自国与国间关系的较少,而来自人与自然间关系的可能较多^[42]”。1983—1987 年联合国世界环境与发展委员会提交了《我们共同的未来》的调查报告,该报告系统分析了人类面临着的一系列重大经济、社会和环境问题,从保护和发展环境资源、满足当代和后代的需要出发,以“可持续发展”为基本纲领,提出了一系列政策目标和行动建议,并正式使用了“环境安全”这一名词^[43]。1989 年,国际应用系统分析研究所正式提出了生态安全的概念^[15]。20 世纪 90 年代初,美国、俄罗斯以及欧盟等国均把“环境安全”或“生态安全”列入国家安全战略的主要目标。1991 年 8 月,美国的《国家安全战略报告》首次将环境安全视为其国家利益的组成部分。国外学者如 Lonergan 等^[44]早就开始发展和宣扬生态安全的概念,论述了环境与生态安全同可持续发展的关系。1993 年 Myers^[45]提出生态安全是地区的资源战争和全球的生态威胁而引起的环境退化,继而牵连到经济和政治的不安全,他在学术刊物和安全分析研讨会上多次提及生态安全。世界环境与发展委员会主席挪威首相布伦特兰夫人(Gro Harlem Brundtland)、联合国前任秘书长 Boutros Ghali 和美国前任副总统 Al Gore 也都是发展和宣扬生态安全概念的先行者。他们认为生态安全是由生态威胁、生态风险等概念发展而来,人类是造成生态威胁的主要责任人,生态安全是人类、社会、政权和全球共同体的一个必要条件,是社会稳定、国家安全和公共安全的重要组成部分^[46]。1996 年《地球公约》的《面对全球生态安全的市民条约》中,约有 100 多个国家的 200 多万人签字,这是生态安全首次得到国际社会的认可,该条约建立在生态安全、可持续发展和生态责任的基础上,力求各成员国和各团体组织相互协调利益、履行责任和义务。2002 年联合国于南非首都约

翰内斯堡召开了环境与可持续发展世界高峰会议,重点讨论了全球生态安全问题,并进一步推动了生态安全研究工作的进程^[47-49]。国外关于生态安全的研究,从微观角度分析主要集中在两个方面,一是基因工程生物的生态(环境)风险与生态(环境)安全;二是化学品的施用对农业生态系统健康及生态(环境)安全的影响^[50-51]。

国外环境质量评价工作始于 20 世纪 60 年代,70 年代得到发展,许多国家在环境科学研究中高度重视环境质量及环境影响评价工作。国外生态环境质量评价始于 20 世纪 80 年代初,如哥伦比亚河流域的生态安全性评估,在区域尺度上建立生态安全性评价指标体系;在加拿大魁北克省采用综合水生生态系统模型对有害化学品给河流、湖泊和水库造成的生态风险进行系统评价;选用恢复力、活力、维持生态系统服务等 8 项指标评价生态系统健康;影响较大的研究是 20 世纪 90 年代初美国环保局提出的环境监测和评价项目,从区域和国家等大尺度评价生态资源状况并对发展趋势进行长期预测,后来发展为州域和小流域等中小尺度环境监测和评价^[52-53]。1990 年美国经济合作与发展组织启动了生态环境指标研究项目,首创了“压力-状态-响应”(P-S-R)模型的概念框架。后来人们推广开来,建立了针对不同问题的 P-S-R 模型。21 世纪以来,综合研究表明,在生态安全评价中,直接的测量、网络分析和模型模拟是必需的,同时也要配合遥感、地理信息系统和景观生态学原理等宏观技术手段,以了解其功能过程^[54]。

综上所述,从严格意义上来讲,国外学者主要在宏观层面对区域生态安全和可持续利用的研究成果较多,主要从概念内涵、理论体系、评价方法、指标体系、动态监测等角度进行研究,但集中对耕地资源生态安全的研究文献还不多见。

1.3 国内研究现状

1.3.1 概念界定

耕地生态安全是近年来提出的新概念,对其含义国内学者先后从不同的学科背景提出了不同的认识和解释。在初始研究阶段我国学者提出耕地利用的环境效应安全应该是耕地生态安全的雏形,它包括耕地开发利用引发的水土流失、土地沙化以及土壤本身质量退化等环境负效应^[4]。早期提出耕地生态安全的概念,即耕地生态安全是指人类赖以生存和发展的耕地资源所处的生态环境,处于一种不受或少受威胁与破坏的健康、平衡状态^[39]。耕地生态

安全状态下,耕地生态系统有稳定、均衡、充裕的自然资源可供利用,耕地生态环境处于无污染、未破坏的不受威胁的健康状态。在发展研究阶段,我国学者进一步发展了耕地生态安全的概念,即耕地资源生态安全是指在一定的时空尺度内,耕地生态系统处于保持自身正常功能结构和满足社会经济可持续发展需要的状态^[8]。包括耕地资源环境安全、耕地生态系统安全和耕地社会经济安全。其中,耕地环境安全是人类赖以生存和发展的耕地资源环境和生物环境处于安全或不受威胁的状态^[55-56],是实现耕地资源生态安全的前提和基础。耕地生态系统安全包括耕地资源生态系统自身的安全(即系统内部结构是否遭到了破坏)和是否能够满足人类生存发展的需求。耕地社会经济安全就是要利用耕地资源的功能与特点实现社会、经济、发展的安全,耕地资源社会经济安全是耕地生态安全的最终实现目标。进入崭新研究阶段学者们进一步梳理概念,认为耕地生态安全是指在一定的时空尺度范围,能够保证自然系统、经济系统和社会系统相互协调作用下,耕地资源所处的生态环境处于一种不受或少受

威胁与破坏的状态下,耕地资源生态系统处于保持自身正常功能结构并能满足社会经济可持续发展需要的状态^[54]。尽管耕地生态安全的概念表述不同,但在其定义的内涵和外延上却形成了许多共识。本文基于土地生态安全的内涵,将耕地生态安全界定为:耕地生态安全是指在一定的时空尺度范围,耕地数量、耕地质量和耕地生态环境三者的有机统一,建立在耕地数量、耕地质量和耕地生态环境安全的基础之上。耕地生态安全系统内的生物与环境之间不断进行着物质循环、能量转换和信息流动,构成它们之间相互联系、相互制约、相互依存;系统内部耕地数量和耕地生态环境是物质基础,耕地质量和耕地生态安全是改造结果(图 1),耕地生态安全是继耕地数量安全、耕地质量安全、耕地生态环境安全之后的更高层次安全和未来发展方向。耕地生态安全是相对于生态威胁的一种功能状态,它是一个相对的、动态的概念。耕地生态安全具有一定的地域性、系统性、动态性、隐蔽性、可控性、外部性、公共性和战略性特征,耕地生态安全是实现生态环境保护、社会经济可持续发展、构建和谐社会的

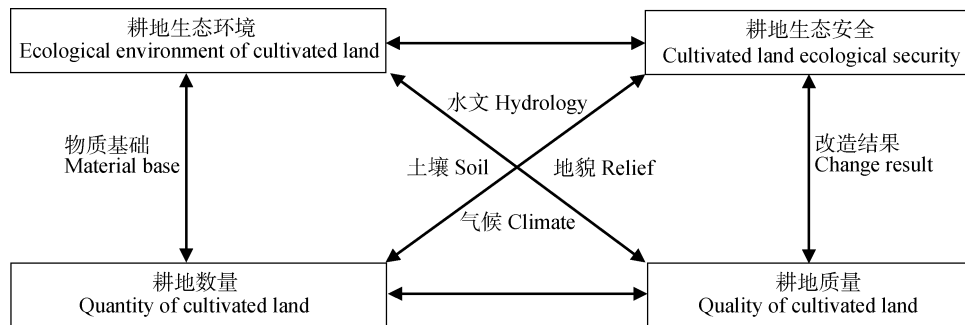


图 1 耕地生态安全系统组成结构图
Fig. 1 Composition structure of cultivated land ecological security system

1.3.2 耕地生态安全特征分析

与国家(地区)或区域的其他保障体系比较,耕地生态安全具有明显的自身特点。从耕地资源利用特征分析,耕地生态安全具有人为性、整体性、不可逆性、长期性、全球性和隐蔽性的特点,但是缺乏深入细致的分析^[39]。从耕地资源社会经济特征分析,耕地生态安全具有公共性、潜隐性和战略性的特征^[8]。耕地资源安全的公共性在很大程度上是由耕地生态安全的外部性决定的。耕地生态环境与耕地数量和质量直接决定着耕地产出物的产量和质量不同,它对耕地产出物的影响是缓慢的,并不直接表现出来,耕地生态环境成为了一种公共产品。耕地生态安全的变化是缓慢而隐蔽的,耕地生态安全从安全态到不安全态的变化需要较长时间,同时这

一变化过程也是难以觉察的,而当我们觉察到这一变化过程时,耕地生态安全状况已经发生了质变。生态安全是国家安全体系的重要内容之一,在社会经济可持续发展过程中,具有至关重要的战略意义。耕地生态系统在整个生态系统中占据着重要地位,耕地生态安全在生态安全中的重要性也不言而喻。在此基础上,王军^[54]还提出综合性也是耕地生态安全的重要特性。耕地生态安全包括诸多方面,而每个方面又有诸多的影响因素,有自然生态方面的、经济和社会方面的,这些因素相互作用,相互影响,使生态安全变得尤为复杂,因此耕地生态安全既有耕地资源的基本特性,又有复杂的社会、经济和生态的综合特征,通过开展不同时间尺度的分析还可发现耕地生态安全具有动态演变特征。

1.3.3 驱动因素分析

国内学者对耕地生态安全影响因素的分析多从某一个视角出发,缺乏全面性和系统性,且注重理论分析,缺乏实证分析^[8]。早期的研究建立在对国土资源公布数据分析的基础上,得出影响我国耕地生态安全的主要因素是人口增长、社会经济发展、土地利用方式与技术水平、环境优化需求、政策因素等^[4]。自然地理方面研究表明地形地貌和自然灾害也是影响重庆三峡库区耕地生态安全的重要因素^[39]。社会经济方面研究指出我国耕地生态安全的影响因素分为直接因素、间接因素和社会经济因素3类^[8]。直接因素是指直接对耕地生态安全产生影响的因素;间接因素是指首先对整个生态安全产生影响,从而间接影响到耕地生态安全的因素;社会经济因素如财政支农投入水平、整个社会的耕地生态安全保护意识等。直接影响因素的作用程度最甚,在耕地生态安全影响因素中占据着主导地位,决定着耕地资源生态安全程度的高低。综合各方意见,有学者认为耕地生态安全影响因素包括自然因素、经济因素和社会因素3个方面,并从耕地数量、质量和生态环境3个方面的动态变化,具体分析石家庄市的影响因素^[54]。已有研究表明,不同尺度耕地生态安全受自然和人类活动系统多方面的影响,只有分离分析各种驱动因素的作用条件、影响范围、动态过程以及不同驱动因素的相互关系,才能合理解释耕地生态安全变化的机理,在此基础上建立的模型才具有较好的预测能力。

1.3.4 评价尺度

从生态学角度来说,尺度是指所研究生态系统的面积大小(空间尺度),或者所研究的生态系统动态的时间间隔(时间尺度)^[57]。尺度选择的不同,可能会导致对生态学格局和过程及其相互作用规律不同程度的把握,最终会影响到研究成果的科学性和实用性^[58-59]。生态安全包含多重尺度,理解耕地生态安全的尺度,是有效进行耕地生态安全评价研究,进而建立耕地生态安全体系的重要前提条件^[49]。从时间尺度来说,耕地生态系统的健康在不同阶段的结构和功能并不相同,各成分之间的能量流动和物质循环在不同的阶段保持着各自相对稳定的动态平衡,并随着环境的变化而发展变化^[60]。以时间“点”为特征的研究能够快速评价耕地的现状和特征,但指标参照值选择的不同往往使其评价结果的经验成分较大,以时间“段”为特征的研究便于认识耕地的动态变化特征,缺点是收集资料的不完整性会造成

结果的不确定性^[60]。从空间尺度来看,耕地生态安全研究涉及从个体、种群、群落、生态系统、景观到流域等不同尺度上的对象,需要有一个适宜的空间尺度将生态安全研究中的宏观生态问题与小尺度上的微观生态问题联系起来^[61]。大尺度研究有利于从总体上把握生态安全的态势;小尺度研究有助于深入细致地探讨生态安全的机理和具体表现。因此,在实际研究中,应根据研究对象的特征、研究目标选择适宜的时间和空间尺度,既要考虑到耕地生态安全的时空统一性,又要考虑到时空差异性,以提高评价结果的真实性。尺度转换是在不同时间或者空间层次上进行连接,将信息或者数据从一个尺度转换(应用)到另外一个尺度的过程。从推演的角度来说,尺度转换分为尺度上推和尺度下推。从国内耕地生态安全评价研究实践来看,评价空间尺度已从全国、省级和流域大尺度区域评估^[4,8]转向地市级中尺度^[41]和县级及以下小尺度区域评估^[54],评价时间尺度由时点^[40]转向10年^[41,54]、20年^[8]甚至更长时段。耕地生态安全具有一定的时空性,研究区域愈大,所得结果与各点位实际情况的差距就愈大,也就愈忽视了区域的差异性^[62]。

1.3.5 评价方法与技术

目前,国内耕地生态安全评价已由前期的定性研究向定量研究方向发展。定性研究为耕地生态安全评价提供了理论依据和科学指导,而通过定量评价,可阐明耕地生态安全的状态、程度和水平,使耕地生态安全更具有可衡量性与可操作性。因此,在耕地生态安全评价中将定性方法与定量方法有机结合,是当前耕地生态安全评价较为合理的发展方向。不少学者在进行生态安全综合评价过程中,不断尝试使用新的研究方法,并取得了较好的研究成果,为今后研究提供了新的思路和途径。目前常用的生态安全评价方法有模糊综合评价法、综合指数法、系统动力学方法、生态承载力法和人工神经网络法等^[36,63]。如王军^[54]依据统计年鉴及实地调查资料,通过直线型无量纲化方法中的极差标准化方法将各指标量化分级,在MATLAB 6.5软件的支持下,采用BP神经网络法对石家庄市耕地生态安全进行了评价,并把耕地生态安全分为较差状态、中等状态、较好状态、很好状态和理想状态5个等级。文森等^[64]运用生态足迹理论中的相关模型测算重庆市不同时段、不同区域的耕地人均生态足迹、人均生态承载力、人均生态盈余/赤字及耕地生态安全度,并以此判定重庆市及其市域范围内三大经济区耕地

资源在不同时段的生态安全状况。目前国内研究大多以统计调查数据为基础,采用传统数理统计分析方法开展定量研究,而多时相遥感数据、实验分析和统计调查数据相结合,采用 3S 技术和地统计空间分析方法为支撑的耕地生态安全评价方法与技术鲜有报道。

1.3.6 评价指标体系

耕地生态安全评价指标体系的建立,其中心是要阐明耕地生态环境与人类社会的相互关系。耕地生态安全评价指标体系是一个复杂的大系统,因此评价指标的设置既要数量适度,又要做到科学合理、符合实际,还要考虑符合统计学的基本范畴。现阶段国内外尚无统一标准的生态安全评价指标体系,常用的区域生态安全评价方法有压力-状态-响应评价指标体系、暴露-响应分析指标体系、景观指标体系、可持续发展指标体系和其他指标体系。以上指标体系各有其优缺点及适用范围,将以上指标体系进行整合,构建以生态学和土壤学为基础,兼顾社会、经济和景观信息等多因素的综合指标体系将是未来耕地生态安全评价的发展方向^[63]。评价指标的选择遵循以下原则:科学性原则、整体性与主导性原则、可获取性与可操作性原则、普遍性与区域性原则、动态性与稳定性原则等^[54]。如从直观因素角度根据耕地生态安全的影响因素和评价内涵,构建了耕地农药施用量、化肥施用量等 6 个直接影响因素指标;耕地面积生活污水承载量、单位耕地面积工业废水承载量等 5 个间接影响因素指标;森林覆盖率、耕地垦殖率等 5 个社会经济影响因素指标的耕地生态安全评价指标体系^[8]。从模型角度建立了基于目标层、因素层和指标层 3 个层面的共 22 个评价指标构成的评价指标体系^[54],其中影响耕地生态安全的自然因素层包括人均耕地、人均未利用地面积、森林覆盖率、水田水浇地面积比重等 7 个指标;影响耕地生态安全的经济因素层包括 GDP 增长率、农业财政支出比重、农民人均纯收入、单位耕地面积化肥施用量等 9 个指标,影响耕地生态安全的社会因素层包括城市化水平、耕地压力指数、人口密度、人口自然增长率等 6 个指标。从地理构成要素角度在吸取土地质量评价指标选择经验的基础上,从理论上提出了包括气候质量、土壤质量、地质地貌、耕地负荷率等 4 个因子层 19 个指标的耕地生态安全评价指标体系^[64]。随着研究的不断深入,国内在构建评价指标上经历了从以往单一的生态安全因素逐渐扩展到涵盖多因素的综合研究,仅仅考

虑社会和经济因素已远远不能满足耕地生态安全评价的需要,把耕地数量、质量和生态环境因素作为评价指标,越来越受到重视。

1.3.7 模拟预测

随着研究的不断深入,人们发现现状和历史的耕地生态安全评价已不能满足人类的社会需求。因此,开展耕地生态安全模拟和预测研究已成为一种必然趋势。为适应社会实践的需求,我国学者提出了农田生态安全预警的概念,即在农田生态环境质量评价的基础上对农田生产开发利用的生态后果、农田生态环境变化以及生态环境与社会经济协调发展的评价、预测和报警^[40]。如徐启荣等^[40]从农田土壤肥力、环境质量、健康质量和产出能力 4 个方面,采用 Microsoft Visual Studio.NET 2003 作为开发平台,对安徽省的农田生态安全进行预警,建立安徽省农田生态安全预警信息系统,阐明了农田生态安全预警指标、预警级别的设置以及系统的功能实现方法等。但该系统只是一个农田生态安全预警系统的原形,仍需要进一步研究与开发,同时该系统预警指标仅仅是各单项指标的研究和预测,没有涉及各评价因子之间的复杂关系,由于缺乏 3S 技术的支撑,无法模拟区域耕地资源生态安全变化过程及其趋势,也没有进行纵向的分时预警、分析,预警结果动态性不强。随着 3S 技术的不断提高,耕地生态安全模拟预测要在积极吸纳各相关学科、领域的研究成果的基础上,由定性向定量、由单因素向多因素综合模拟发展。

1.3.8 生态安全保护措施

在我国经济社会发展转型时期,耕地保护对于保障国家粮食安全、维护社会稳定、保护区域生态环境安全、促进城乡统筹协调发展以及提升农业发展潜力空间具有重要作用^[65-66],由此决定了耕地生态安全保护的发展态势。有学者从耕地利用转型角度提出耕地生态安全保护应以城乡居民对耕地多功能需求为导向,更加注重节约资源和保护环境,通过一系列土地利用工程措施和土地整治活动,实现耕地数量、质量和空间格局的保护与稳定协调发展^[67]。有学者从行政管理角度提出了加强耕地生态安全管理的对策措施,主要是加强宣传教育,提高群众的保护意识、完善法规政策,建立预警系统、加强耕地生态恢复和重建,防治农业污染、建立生态补偿机制、控制人口数量,实现人地协调、开展土地整理以及挖掘后备耕地资源,实现耕地数量和质量均衡^[68-69]。还有从加强立法角度,根据耕地生

态安全处于“风险级”的状况,提出加大耕地生态保护资金投入、提高农业机械化水平、加大农资投入的管理力度、统筹耕地资源生态安全与经济发展、建立耕地生态保护的法律法规5条措施^[70]。从保障制度方面学者提出了维护区域耕地生态安全的保障制度,包括制度保障、资金保障和科技保障3个方面^[39]。耕地生态安全保护涉及耕地多功能需求与耕地利用状况,自然与社会经济状况以及空间形态与功能形态等多层次、多维度^[67],迫切需要在对其进行多层次解构的基础上,因地制宜地建立相应的保护对策措施。

2 研究进展评价

纵观国内外研究,耕地生态安全研究的重要性已经获得了广泛认可。专家学者从可持续发展角度出发,对耕地生态安全问题从理论到方法进行了研究和实践,取得了重要研究进展,为深入系统的研究奠定了良好的基础。但由于研究对象的复杂性以及受限于不完善的理论体系和研究方法,目前仍然存在着需要迫切解决的问题,需要在以下几个方面开展工作:

1)关注中尺度耕地生态安全研究。不同的时空尺度范围,耕地生态系统安全具有不同的表现特征和干扰机制。由于耕地生态系统的复杂性,目前的研究多集中于在宏观空间尺度和较短时间尺度上开展,且观测尺度和研究尺度较为孤立和单一,而中尺度综合研究相对缺乏,难以从整体上把握区域耕地生态安全动态特征与演变机理。随着高分辨率遥感技术的发展和深度监测技术的提高,能够满足未来研究中所需的在时空上连续的、大面积的同步数据,将多尺度区域在不同时间段的研究达到有机统一^[34,71]。已有研究表明,中尺度上推可到省级、流域尺度,下推则可与县(区)小尺度印证,是最佳的研究尺度,因此,中尺度耕地生态安全研究将是该领域的一个发展趋势。

2)建立耕地生态安全评价指标体系。研究者针对不同的研究区域和研究目的,提出了各种不同的评价指标体系,既涉及大量的地形、植被等自然要素,也包含了耕地景观指数、景观功能等生态指标以及社会、经济、人为压力等诸多因子。然而过多的评价指标会使生态安全问题更加复杂化,增加了实际评价工作的难度。生态安全指标数尽可能减少到易控制和操作的水平上是最重要的。因此,在构建指标体系上,应选取尽可能少的指标来反映耕地

生态安全的整体特征,避免评价指标体系普遍存在指标信息覆盖不全或指标间信息重叠的现象,以增强耕地观测指标的实用性。评价指标选择不仅要重视社会和经济因素对耕地生态安全的影响,把耕地数量、质量和生态环境因素作为评价指标也应受到重视。

3)完善和创新相关模型方法。耕地生态安全评价方法与技术研究尚处于起步阶段,尤其在耕地生态安全评价模型方面还不够完善。目前国内外耕地生态安全研究中量化的数理评价模型较多,空间评价模型较少,并且以静态评价为主,缺少动态评价方法。因此,未来耕地生态安全评价研究应加强如何将数理模型与3S技术相结合,构建耕地生态安全空间评价模型,将空间数据整合到评价体系中,还应在静态评价的基础上深入探讨动态评价的方法和模型,寻求维护耕地生态安全的关键性要素和过程,为耕地生态安全的预警、预测和决策提供科学依据。

3 结语

通过回顾国内外学者对耕地生态安全问题的研究,可以发现,受各种条件限制这些研究多侧重于以整个土地资源安全为研究对象,单独以耕地资源生态安全为研究对象的研究并不多见,通常将其作为耕地资源安全的一个方面加以表述,缺乏深入细致的分析;另一方面,耕地生态安全概念初步建立,耕地生态安全评价刚刚起步,现有研究多侧重于现状分析,缺乏动态变化和模拟研究^[6,72]。近年来,有关珠江三角洲地区耕地资源数量^[73-76]、质量变化^[77-79]、驱动机制^[80-82]、景观格局^[83-84]及其与社会经济发展之间关系^[85-86]的研究较多,过于强调耕地数量、质量安全及预警研究,相对忽视耕地资源生态安全的研究,因此,开展耕地生态安全评价与模拟研究十分迫切,对于完善耕地资源安全研究具有重要的理论和现实意义。

参考文献

- [1] 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 B J, Song G. 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
- [2] Beesley K B, Ramsey D. Agricultural land preservation[J].

- International Encyclopedia of Human Geography, 2009, 25(6): 65–69
- [3] Rasul G, Thapa G B. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh[J]. World Development, 2003, 31(10): 1721–1741
- [4] 赵其国, 周炳中, 杨浩, 等. 中国耕地资源安全问题及相关对策思考[J]. 土壤, 2002, 34(6): 293–302
Zhao Q G, Zhou B Z, Yang H, et al. Chinese cultivated land resources security problems and related countermeasures[J]. Soils, 2002, 34(6): 293–302
- [5] 余振国, 胡小平. 我国粮食安全与耕地的数量和质量关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 45–49
Yu Z G, Hu X P. Research on the relation of food security and cultivated land's quantity and quality in China[J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(3): 45–49
- [6] 李青丰. 生态安全对防止耕地隐性流失和保证粮食安全的意义[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(3): 11–15
Li Q F. Ecological safety: The fundamental base for preventing arable land loss and food security[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3): 11–15
- [7] 朱红波, 张安录. 我国耕地资源生态安全的时空差异分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(6): 754–758
Zhu H B, Zhang A L. Analysis on spatial-temporal difference in ecological security of cultivated land resources in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(6): 754–758
- [8] 朱红波. 我国耕地资源生态安全的特征与影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2008, 29(2): 194–197
Zhu H B. Characters and influencing factors of cultivated land resource ecological security in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(2): 194–197
- [9] 李玉平, 蔡运龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(6): 784–789
Li Y P, Cai Y L. Security evaluation of land ecology in Hebei Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(6): 784–789
- [10] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 241–246
Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the loess plateau of China[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(3): 241–246
- [11] 王千, 金晓斌, 周寅康. 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 5903–5909
Wang Q, Jin X B, Zhou Y K. Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 5903–5909
- [12] 李明月, 赖笑娟. 基于 BP 神经网络方法的城市土地生态安全评价——以广州市为例[J]. 经济地理, 2011, 31(2): 289–293
Li M Y, Lai X J. Evaluation on ecological security of urban land based on BP neural network: A case study of Guangzhou[J]. Economic Geography, 2011, 31(2): 289–293
- zhou[J]. Economic Geography, 2011, 31(2): 289–293
- [13] 徐辉, 雷国平, 崔登攀, 等. 耕地生态安全评价研究——以黑龙江省宁安市为例[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6): 180–189
Xu H, Lei G P, Cui P D, et al. Study on evaluation for ecological security of cultivated land: A case study of Ning'an City in Heilongjiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(6): 180–189
- [14] 王千, 金晓斌, 周寅康. 河北省耕地生态安全及空间聚集格局[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 338–344
Wang Q, Jin X B, Zhou Y K. Cultivated land ecological security and spatial aggregation pattern in Hebei Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 338–344
- [15] 陈星, 周虎成. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8–20
Chen X, Zhou H C. Review of the studies on ecological security[J]. Progress in Geography, 2005, 24(6): 8–20
- [16] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354–358
Xiao D N, Chen W B, Guo F L. On the basic concepts and contents of ecological security[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3): 354–358
- [17] 龚建周, 夏北成, 刘彦随. 基于空间统计学方法的广州市生态安全空间异质性研究[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5626–5634
Gong J Z, Xia B C, Liu Y S. Study on spatial-temporal heterogeneities of urban ecological security of Guangzhou based on spatial statistics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5626–5634
- [18] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8–15
Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8–15
- [19] 杨光梅, 闵庆文, 李文华, 等. 我国生态补偿研究中的科学问题[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4289–4300
Yang G M, Min Q W, Li W H, et al. Scientific issues of ecological compensation research in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4289–4300
- [20] 王韩民, 郭玮, 程漱兰, 等. 国家生态安全: 概念、评价及对策[J]. 管理世界, 2001(2): 149–156
Wang H M, Guo W, Cheng S L, et al. National ecological security: The concept, evaluation and countermeasures[J]. Management World, 2001(2): 149–156
- [21] 郑荣宝, 刘毅华, 董玉祥. 广州市土地资源安全预警及耕地安全警度判定[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1362–1368
Zheng R B, Liu Y H, Dong Y X. Study on the pre-warning system frame of land security and evacuation on alert degree of cultivated land in Guangzhou City[J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1362–1368
- [22] 徐海根. 自然保护区生态安全设计的理论与方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000
Xu H G. The Theory and Methodology of Ecological Security Design for Nature Reserves[M]. Beijing: Chinese Environment Science Press, 2000

- [23] 曲格平. 中国环境与资源的形势和对策[J]. 中国人口·资源与环境, 1994, 4(3): 4-8
Qu G P. Forms and countermeasures about Chinese environment and resources[J]. China Population, Resources and Environment, 1994, 4(3): 4-8
- [24] 虞孝感. 长江流域生态安全问题及建议[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 294-298
Yu X G. The problems of ecological security in the Yangtze Basin and some suggestions[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 294-298
- [25] 邹长新, 沈渭寿. 生态安全研究进展[J]. 农村生态环境, 2003, 19(1): 56-59
Zou C X, Shen W S. Advances in ecological security[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2003, 19(1): 56-59
- [26] 钟祥浩, 刘淑珍, 王小丹, 等. 西藏生态环境脆弱性与生态安全战略[J]. 山地学报, 2003, 21(12): 1-6
Zhong X H, Liu S Z, Wang X D, et al. Eco-environmental fragility and ecological security strategy in Tibet[J]. Journal of Mountain Science, 2003, 21(12): 1-6
- [27] 关文彬, 谢春华, 马克明, 等. 景观生态恢复与重建是区域生态安全格局构建的关键途径[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 65-73
Guan W B, Xie C H, Ma K M, et al. A vital method for constructing regional ecological security pattern: Landscape ecological restoration and rehabilitation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 65-73
- [28] 彭补拙, 窦贻伦, 张燕. 用动态的观点进行环境综合质量评价[J]. 中国环境科学, 1996, 16(1): 16-19
Peng B Z, Dou Y J, Zhang Y. Comprehensive environmental quality evaluation using dynamic view[J]. China Environmental Science, 1996, 16(1): 16-19
- [29] 赵跃龙, 张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究[J]. 地理科学进展, 1998, 17(1): 67-72
Zhao Y L, Zhang L J. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment[J]. Progress in Geography, 1998, 17(1): 67-72
- [30] 张峥, 张建文, 李寅年, 等. 湿地生态评价指标体系[J]. 农业环境保护, 1999, 18(6): 283-285
Zhang Z, Zhang J W, Li Y N, et al. Study on ecological evaluation index system for wetland[J]. Agro-Environmental Protection, 1999, 18(6): 283-285
- [31] 叶亚平, 刘鲁君. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(3): 33-36
Ye Y P, Liu L J. A preliminary study on assessment indicator system of provincial eco-environmental quality in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(3): 33-36
- [32] 周华荣, 潘伯荣, 海热提·涂尔逊. 新疆生态环境现状综合评价研究[J]. 干旱区地理, 2001, 24(1): 23-29
Zhou H R, Pan B R, Turson H. A synthetocal evaluation on the present situation of the ecological environment in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2001, 24(1): 23-29
- [33] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 67-71
Zuo W, Wang Q, Wang W J, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard[J]. Geography and Geo-Information Science, 2002, 18(1): 67-71
- [34] 左伟, 张桂兰, 万必文, 等. 中尺度生态评价研究中网格空间尺度的选择与确定[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 267-271
Zuo W, Zhang G L, Wan B W, et al. Study of determining the GIS raster size in mid-scale ecological assessment research[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(3): 267-271
- [35] 左伟, 周慧珍, 王桥, 等. 区域生态安全综合评价与制图——以重庆市忠县为例[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 203-209
Zuo W, Zhou H Z, Wang Q, et al. Comprehensive assessment and mapping of the regional ecological safety: A case study of Zhongxian County, Chongqing City[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 203-209
- [36] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全综合评价模型分析[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 209-214
Zuo W, Wang Q, Wang W J, et al. Comprehensive assessing models for regional ecological security[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 209-214
- [37] 陈东景, 徐中民. 西北内陆河流域生态安全评价研究——以黑河流域中游张掖地区为例[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 219-224
Chen D J, Xu Z M. Study on assessment of the ecological security in the continental watersheds in northwest China — A case study at the middle reaches of Heihe River watershed, Zhangye prefecture[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(3): 219-224
- [38] 高阳, 高甲荣, 李付杰, 等. 基于河道-湿地-缓冲带复合指标的京郊河溪生态评价体系[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 5149-5160
Gao Y, Gao J R, Li F J, et al. Assessing the ecological conditions of stream ecosystems in the suburb of Beijing using a channel-wetland-riparian index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 5149-5160
- [39] 张传华. 耕地生态安全评价研究——以重庆三峡库区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2006
Zhang C H. Study on the evaluation of land ecological security taking Chongqing Three Gorges Reservoir Area as an example[D]. Congqing: Southwest University, 2006
- [40] 徐启荣, 赵海强, 江云, 等. 安徽省农田生态安全预警信息系统研究与建立[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(30): 9615-9618
Xu Q R, Zhao H Q, Jiang Y, et al. Study and establishment on farmland ecological security pre-warning information system of Anhui Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(30): 9615-9618
- [41] 文森. 重庆市耕地资源安全与预警研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008
Wen S. Study on cultivated land resource security and early warning of Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2008
- [42] Brown L R. 建设一个持续发展的社会[M]. 祝友三, 译. 北京: 科学技术文献出版社, 1984: 78-80
Brown L R. Building a Sustainable Society[M]. Zhu Y S, Translation. Beijing: Science and Technology Literature Press,

- 1984: 78–80
- [43] World Commission on Environment and Development (WCED). Our Common Future[M]. New York: Oxford University Press, 1987: 143–146
- [44] Lonergan S, GECHS. Global environmental change and human security: GECHS science plan[R]. Bonn, Germany: International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 1999
- [45] Myers N. Environment and security[J]. Foreign Policy, 1989, 74(1): 23–41
- [46] Herrmann S, Dabbert S, Raumer H G S V. Threshold values for nature protection areas as indicators for bio-diversity: A regional evaluation of economic and ecological consequences[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 98(1/3): 493–506
- [47] Smith W, Meredith T C, Johns T. Exploring methods for rapid assessment of woody vegetation in the Batemi Valley, North-central Tanzania[J]. Biodiversity & Conservation, 1999, 8(4): 441–470
- [48] Espejel I, Fischer D W, Hinojosa A, et al. Land-use planning for the Guadalupe Valley, Baja California, Mexico[J]. Landscape and Urban Planning, 1999, 45(4): 219–232
- [49] Lee J T. The role of GIS in landscape assessment: Using land-use-based criteria for an area of the Chiltern Hills area of outstanding natural beauty[J]. Land Use Policy, 1999, 16(1): 23–32
- [50] 桑卫国, 马克平, 魏伟. 国内外生物技术安全管理机制[J]. 生物多样性, 2000, 8(4): 413–421
Sang W G, Ma K P, Wei W. Management mechanism of biotechnology safety in China and abroad[J]. Biodiversity Science, 2000, 8(4): 413–421
- [51] 石培华, 陈同斌. 重视农业生物技术的生态环境风险问题[J]. 中国人口·资源与环境, 1999, 9(2): 79–81
Shi P H, Chen T B. Pay attention to the ecological environment risks of agricultural biotechnology[J]. China Population, Resources and Environment, 1999, 9(2): 79–81
- [52] McDonald M E. EMAP overview: Objectives, approaches, and achievements[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64(1): 1–8
- [53] Smith E R. An overview of EPA's regional vulnerability assessment (ReVA) program[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 64(1): 9–15
- [54] 王军. 石家庄市耕地动态变化与生态安全评价研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009
Wang J. Study on the dynamic changes of cultivated land and ecological security assessment of Shijiazhuang City[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2009
- [55] 彭少麟, 郝艳茹, 陆宏芳, 等. 生态安全的涵义与尺度[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(6): 27–31
Peng S L, Hao Y R, Lu H F, et al. The meaning and scales of ecological security[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(6): 27–31
- [56] 杨京平. 生态安全的系统分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
Yang J P. Systematic Analysis of Ecological Security[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002
- [57] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001
Fu B J, Chen L D, Wang J, et al. Principle and Application of Landscape Ecology[M]. Beijing: Science Press, 2001
- [58] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2096–2105
Lü Y H, Fu B J. Ecological scale and scaling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12): 2096–2105
- [59] 马胜男, 岳天祥, 吴世新. 新疆阜康市景观多样性模拟对空间尺度的响应[J]. 地理研究, 2005, 25(2): 359–367
Ma S N, Yue T X, Wu S X. Considering effect of spatial scale on landscape diversity simulation: The case of Fukang City in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Geographical Research, 2005, 25(2): 359–367
- [60] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 121–125
Cui B S, Yang Z F. Temporal-spatial scale characteristic of wetland ecosystem health[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 121–125
- [61] 张艳芳, 任志远. 景观尺度上的区域生态安全研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(6): 815–818
Zhang Y F, Ren Z Y. Regional ecological security on landscape scale[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2005, 35(6): 815–818
- [62] 李小建, 刘钢军, 钱乐祥, 等. 中尺度流域土地利用/土地覆盖变化评估——以伊洛河中部地区为例[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 289–296
Li X J, Liu G J, Qian L X, et al. Assessment of land use and land cover change in a middle size catchment: A case study of the middle Yiluo Area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4): 289–296
- [63] 刘艳艳, 吴大放, 王朝晖. 湿地生态安全评价研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(1): 69–75
Liu Y Y, Wu D F, Wang Z H. Research review on ecological security assessment of wetland[J]. Geography and Geo-Information Science, 2011, 27(1): 69–75
- [64] 文森, 邱道持, 杨庆媛, 等. 耕地资源安全评价指标体系研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 466–470
Wen S, Qiu D C, Yang Q Y, et al. Study on the index system of infield resources safety estimation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 466–470
- [65] 蔡运龙. 中国农村转型与耕地保护机制[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 1–6
Cai Y L. The mechanisms of cropland conservation in Chinese rural transformation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 1–6
- [66] 宋小青, 欧阳竹. 中国耕地多功能管理的实践路径探讨[J]. 自然资源学报, 2012, 27(4): 540–551
Song X Q, Ouyang Z. Route of multifunctional cultivated land management in China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(4): 540–551
- [67] 宋小青, 吴志峰, 欧阳竹. 耕地转型的研究路径探讨[J]. 地理研究, 2014, 33(3): 403–413
Song X Q, Wu Z F, Ouyang Z. Route of cultivated land

- transition research[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(3): 403–413
- [68] 付红娜, 谭术魁. 湖北省近十年耕地生态安全问题及对策研究[J]. *国土资源科技管理*, 2008, 25(1): 155–158
Fu H N, Tan S K. A study of problems in farmland ecological safety in Hubei Province and countermeasures[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2008, 25(1): 155–158
- [69] 彭婵. 江汉平原耕地资源生态安全评价研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2013
Peng C. Research on cultivated land resource ecological security evaluation for Jiangnan Plain[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2013
- [70] 陈园园. 山东省耕地资源安全评价[D]. 济宁: 曲阜师范大学, 2011
Chen Y Y. Land resources ecological security evaluation in Shandong Province[D]. Jining: Qufu Normal University, 2011
- [71] 李占胜, 潘剑君. 基于尺度转换提高 MODIS 影像耕地解译精度的研究——以苏北平原为例[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 240–244
Li Z S, Pan J J. The cultivated land extraction from MODIS image based on scale advance: A case study of northern Jiangsu Province[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2): 240–244
- [72] 黄鹏, 赖雪梅, 黄丽芸. 广州市耕地生态安全动态评价[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(12): 210–212
Huang P, Lai X M, Huang L Y. Dynamic evaluation of farmland ecological safety in Guangzhou[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(12): 210–212
- [73] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 151–160
Shi P J, Chen J, Pan Y Z. Landuse change mechanism in Shenzhen City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 151–160
- [74] 曹康琳, 廖金凤. 珠江三角洲耕地资源变化区域差异及对策[J]. *中国人口·资源与环境*, 2000, 10(2): 75–78
Cao K L, Liao J F. Analysis of the regional differences, the influencing indicator and the strategy in the changes of the cultivated land in the delta of the Pearl River[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2000, 10(2): 75–78
- [75] 袁中友, 杜继丰. 珠江三角洲地区耕地资源紧缺态势分析[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 188–190
Yuan Z Y, Du J F. Analysis on state of insufficiency of cultivated land in the Pearl River delta[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(1): 188–190
- [76] 刘毅华. 珠江三角洲耕地数量变化及其可持续利用对策——以南海市为例[J]. *国土与自然资源研究*, 2003(2): 34–36
Liu Y H. The quantitative change of cultivated land and its sustainable use in Nanhai City[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2003(2): 34–36
- [77] 陈玉娟, 温琰茂, 柴世伟. 珠江三角洲农业土壤重金属含量特征研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(3): 75–87
Chen Y J, Wen Y M, Cai S W. The heavy metal content character of agricultural soil in the Pearl River delta[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(3): 75–87
- [78] 钟继洪, 余炜敏, 骆伯胜, 等. 珠江三角洲耕地土壤质量演化及其机制[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1917–1922
Zhong J H, Yu W M, Luo B S, et al. The cultivated land soil quality change and mechanism in the Pearl River delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1917–1922
- [79] 涂高坤, 杨俊波. 中国耕地质量等级调查与评定——广东卷[M]. 北京: 中国大地出版社, 2010
Tu G K, Yang J B. Investigation and Assessment of Cultivated Land Quality Grade in China—Guangdong Volume[M]. Beijing: China Land Press, 2010
- [80] 唐常春, 陈烈, 魏成. 大都市边缘区域耕地数量变化的时空特征及动力机制——以广州市花都区为例[J]. *资源科学*, 2006, 28(5): 43–49
Tang C C, Chen L, Wei C. Analysis on space-time characteristic and dynamical mechanism of cultivated land quantity change in border regions of the metropolis: A case study on Huadu, Guangzhou[J]. *Resources Science*, 2006, 28(5): 43–49
- [81] 吴大放, 刘艳艳, 董玉祥, 等. 珠海市耕地变化时空特征及其驱动力分析[J]. *热带地理*, 2009, 29(5): 472–476
Wu D F, Liu Y Y, Dong Y X, et al. Analysis on the spatial-temporal changes of cultivated land and their driving forces in Zhuhai[J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(5): 472–476
- [82] 吴大放, 刘艳艳, 王朝晖. 基于 Logistic-CA 的珠海市耕地变化机理分析[J]. *经济地理*, 2014, 34(1): 140–147
Wu D F, Liu Y Y, Wang C H. Mechanism of cultivated land change in Zhuhai City based on a Logistic-CA model[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(1): 140–147
- [83] 周静, 吴志峰, 李定强, 等. 珠江口两岸耕地景观破碎化定量分析[J]. *热带地理*, 2005, 25(2): 107–110
Zhou J, Wu Z F, Li D Q, et al. A quantitative analysis on the fragmentation of cultivated land on the two sides of the Zhujiang estuary[J]. *Tropical Geography*, 2005, 25(2): 107–110
- [84] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 等. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用[J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1430–1438
Liu X P, Li X, Chen Y M, et al. Landscape expansion index and its applications to quantitative analysis of urban expansion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(12): 1430–1438
- [85] 叶长盛, 董玉祥. 广州市耕地数量与产业结构变化的关系研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2007, 28(2): 20–23
Ye C S, Dong Y X. Studies on the relation between arable land quantity in Guangzhou and industry structure change[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2007, 28(2): 20–23
- [86] 叶嘉安, 黎夏. 珠江三角洲经济发展、城市扩张与农田流失研究——以东莞市为例[J]. *经济地理*, 1999, 19(1): 67–72
Ye J A, Li X. Economic development, urban sprawl, and agricultural land loss in the Pearl River Delta, China[J]. *Economic Geography*, 1999, 19(1): 67–72