

# 中国耕地健康产能综合评价与试点评估研究

叶思菁<sup>1,2</sup>, 宋长青<sup>1,2</sup>, 程 锋<sup>3</sup>, 张蕾娜<sup>3</sup>, 程昌秀<sup>1,2\*</sup>, 张 超<sup>4</sup>,  
杨建宇<sup>4</sup>, 朱德海<sup>4</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京, 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京, 100875;  
3. 自然资源部国土整治中心, 北京, 100035; 4. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京, 100083)

**摘 要:** 评价中国耕地健康产能状况, 分析危及耕地健康的区域性关键问题, 对探索可持续的耕地利用路径, 维护国家粮食安全与生态安全具有重要意义。耕地健康产能是耕地自然系统与利用系统综合作用的结果, 直接计算耕地健康产能状况是复杂困难的。因此, 该文尝试采用一种简化的方法评价耕地健康产能, 即分别评价耕地健康与耕地产能状况, 并通过耦合耕地健康与产能, 分析耕地利用合理程度与生产能力之间的相互作用特征。其中耕地健康状况强调从不同方面评价人对耕地利用的适宜程度并体现区域耕地不合理利用的主导因素。该文以全国范围 65 个县(市)作为研究对象, 应用地形特征、土壤性状、耕作条件、环境状况和生物特性 5 类指标整合影响耕地健康的关键因子并评价耕地健康状况, 在此基础上, 通过分析指标标准差收敛特征与评价因子的评分规则定义各指标的临界健康与亚健康阈值, 将试点县划分为健康、亚健康与不健康 3 类, 进而分析不同健康状况的分布特征。同时, 综合区域气候条件、耕地自然条件与耕作技术水平评价耕地产能水平, 并分析区域耕地健康-耕地产能作用特征。结果表明, 试点县耕地亚健康及不健康类型表现出显著区域性特征, 不同试点县限制耕地健康的关键要素存在差异; 一方面, 耕作条件的亚健康状况普遍(数量占比约 40%), 表现为耕地破碎化严重以及农田基础设施不完善, 也反映出高标准农田建设的迫切需求; 另一方面, 生物特性形式严峻, 表明在气候条件-土壤结构-耕作技术等因素相互作用下耕地保障动物健康生长的能力正面临退化。此外, 通过耕地健康与耕地产能耦合分析, 该文将试点县耕地健康产能特征划分为“健康-高产能”、“健康-低产能”、“亚健康-高产能”、“亚健康-低产能”、“不健康-高产能”、“不健康-低产能”6 类, 并分析不同类型区域耕地保护的重点方向, 其中“不健康/亚健康-高产能”区域分布广泛, 是中国实施藏粮于地、藏粮于技战略的关键地带, 应兼顾耕地健康与耕地产能, 加强提升耕地健康状况的方法研究与实践。该项研究为耕地健康产能提升提供科学依据, 为不同区域耕地资源保护路径设计提供有效支撑。

**关键词:** 土地利用; 地理信息系统; 耕地; 耕地健康; 耕地产能; 气候变化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.22.008

中图分类号: F323.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-22-0066-13

叶思菁, 宋长青, 程 锋, 张蕾娜, 程昌秀, 张 超, 杨建宇, 朱德海. 中国耕地健康产能综合评价与试点评估研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 66-78. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.22.008 http://www.tcsae.org  
Ye Sijing, Song Changqing, Cheng Feng, Zhang Leina, Cheng Changxiu, Zhang Chao, Yang Jianyu, Zhu Dehai. Cultivated land health-productivity comprehensive evaluation and its pilot evaluation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(22): 66-78. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.22.008 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

粮食安全问题是关系人类可持续发展基本需求的世界性问题<sup>[1]</sup>。FAO 报告指出, 近年来全球仍有近 10 亿人缺乏饮食保障<sup>[2]</sup>, 并且随着人口数量、社会经济状况、气候条件等因素变化, 至 2050 年全球粮食需求将增长近 70%<sup>[3]</sup> (也有研究提出粮食需求增长 100%~110%<sup>[4]</sup>)。2019 年 8 月, IPCC 《气候变化与土地报告》则指出耕地

退化在危及粮食安全同时也会加剧气候变化, 可持续耕地利用对减少土壤侵蚀, 消除饥饿以及应对气候变化具有重要作用<sup>[5]</sup>。这为全球科学家和政策制定者提出了一个艰巨的挑战—如何在粮食产量持续增加的同时, 保护耕地生态系统稳定, 满足农业和社会经济的可持续发展<sup>[6-7]</sup>。而中国作为世界人口大国, 粮食安全问题长期以来更是备受全球众多学者与研究机构广泛关注<sup>[8]</sup>。事实证明, 近年来即便快速城镇化与经济发展引起优质耕地资源减少、耕地土壤退化等问题, 中国用全球 7% 的耕地养活 22% 的人口, 实现粮食产量的“十三连增”, 为实现联合国千年发展目标做出重要贡献<sup>[9-10]</sup>。然而, 在粮食产量不断增长同时, 化肥农药使用量超标、重金属污染<sup>[11]</sup>、东北土层变薄<sup>[12]</sup>、土壤有机质含量下降<sup>[13]</sup>、地下水位降低<sup>[14]</sup>等问题也日益加剧, 严重制约中国耕地可持续利用与生态安全。因此, 评价耕地健康产能状况, 分析不同区域

收稿日期: 2019-08-12 修订日期: 2019-09-26

基金项目: “美丽中国”科学院先导科技专项(XDA23100303); 国家自然科学基金资助项目(41801300); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018NTST03)。

作者简介: 叶思菁, 博士, 讲师, 主要从事耕地安全评价与耕地可持续利用路径研究。Email: yesj@bnu.edu.cn

\*通信作者: 程昌秀, 博士, 博士生导师, 主要从事空间信息技术及其在土地资源领域应用研究。Email: chengcx@bnu.edu.cn

危及耕地健康的关键问题，对探索可持续的耕地利用路径，维护国家粮食安全与生态安全具有重要意义。

从概念与内涵角度梳理，国内外与耕地健康产能相关的研究主要集中在土壤健康、生态系统健康、耕地产能等方面。在土壤健康方面，1941 年，Leopold 首先提出土地健康是指土地被人类占用但其功能没有被破坏的状态，土地有机体具有自我更新能力，并使用土地疾病来描绘土地功能紊乱<sup>[15]</sup>。Rapport 与 Sparling 等则提出相比于土壤质量，土壤健康更侧重于土壤内在属性的状态而忽略其对确切功能的考量（后者正是土壤质量评价的重点）<sup>[16-17]</sup>。Hodgson 与 Kumar 等也分别探讨了耕地健康的内涵<sup>[18-19]</sup>。在生态系统健康方面，众多学者提出通过活力、组织结构和恢复力等特征来表达生态系统所具有稳定性和持续性<sup>[20-22]</sup>。在耕地产能方面，众多学者认为耕地产能即耕地综合生产能力，是一定时期、一定经济与地域条件下形成的耕地生产能力，并研究不同尺度下耕地的理论产能、可实现产能与实际产量相互关系<sup>[23-26]</sup>。上述研究均已形成相对完整的概念和内涵，并对耕地健康产能有重要借鉴作用，但未能对自然-社会-经济综合影响的耕地健康产能进行系统性的理论梳理。在上述研究基础上，近年来中国学者开始逐渐关注耕地健康产能的概念与内涵。叶兴庆等提出“五毒产能”，归纳了 5 种不健康的耕地产能挖掘模式<sup>[27]</sup>。李强等人提出耕地健康内涵<sup>[28]</sup>，并构建由耕地质量、产能和土壤环境组成的耕地健康多层次模糊评价体系，评价研究区耕地的健康、亚健康和不健康状态<sup>[29]</sup>。本文采用郇文聚等的观点<sup>[30]</sup>，认为健康产能是耕地利用过程中各种功能的正常体现，始终具备持续、稳定地进行农业生产的能力，具有自我调节和对损害的恢复能力，在一个完整的生产周期内能够通过耕地的自净能力实现自我更新，且生产的农产品不会对人体健康造成影响。

从评价方法角度梳理，20 世纪 60 年代以来，美国、英国、荷兰、澳大利亚等国均开展了土地评价方面的研究工作，但多以土地分类和土地潜力分类为主，例如美国于 1961 年采用划分土地利用潜力等级的方法，从土壤特征出发进行土地潜力评价，分为潜力级、亚潜力级和潜力单位 3 级<sup>[31]</sup>。1976 年，FAO 颁布的“土地评价纲要”从土地适宜性角度，应用纲、类、亚类、单元 4 级评价土地生产的适宜性程度、限制性因素与管理需求，并被广泛应用于各国土地评价项目<sup>[32-35]</sup>。至 80 年代末，随着人口增长、土地退化和环境问题的日益加剧，土地可持续利用问题逐渐成为该领域研究重点，而“土地评价纲要”由于缺乏空间、过程和动态分析，未能指出土地利用持续性问题，逐渐无法满足应用需求<sup>[36-38]</sup>。1993 年，FAO 制定“可持续土地利用管理大纲”，从生产、稳定、可行、可承受、保护性进行土地可持续评价<sup>[39]</sup>。2001 年起，康奈尔土壤健康团队综合考虑数据获取的难易程度与农户的可接受度，确定了 13 项指标（包括物理指标 5 项，生物指标 4 项，化学指标 4 项）综合评定土壤健康状况<sup>[40]</sup>。Vincent 等人应用缩减回归（RR），主成分回归（PCR），偏最小二乘回归（PLSR），等方法分析了 10 种

土壤理化属性指标的相互作用特征，并提出土壤有机碳，土壤容重，碳氮比与导电率是影响土壤质量的最主要变量<sup>[41]</sup>。然而，上述研究更多关注“土壤在生态系统和土地利用范围内发挥作用以维持生物生产能力、维持环境质量、促进植物和动物健康的能力”<sup>[42]</sup>，缺乏对影响耕地可持续利用的各种核心要素的综合分析。2016 年，美国自然保护协会针对土壤退化严重问题制定土壤健康路线图<sup>[43]</sup>，从科学，经济与政策 3 方面提出建议，以期推动美国农田管理模式转变，为耕地保护与利用提供指导。该研究将增强气候-土壤-耕作系统综合认知分析作为未来重要发展方向。此外，由于中国幅员辽阔，区域气候-土壤-基础设施-自然资源-社会经济条件差异化特征复杂，也提升了耕地评价的难度。2008 年，农业部以指导农业生产、提升耕地产量为目标颁布《耕地地力调查与质量评价技术规程》<sup>[44]</sup>，从耕地地力和土壤环境质量 2 个方面评价耕地质量，取得良好的应用成果，但一定程度上未能体现气候条件与基础设施条件对农业生产的影响。原国土资源部也先后颁布《农用地质量分等规程》<sup>[45]</sup>与《土地质量地球化学评价规范》<sup>[46]</sup>，以耕地资源保护为目标系统全面地调查农用地产能状况、土壤养分元素、土壤重金属环境、灌溉水环境、大气干湿沉降物等指标，但存在相关成果缺乏统一梳理整合，无法反映土壤动物活性等问题。

综上所述，耕地健康产能是耕地自然系统与利用系统综合作用的结果，其中耕地产能较很大程度上是由自然系统主导的（如光照、温度、降水、土壤理化性质等），而耕地健康问题则主要由于人类的不合理利用。并且由于耕地健康产能的内涵丰富，影响耕地健康产能的因素众多且作用过程复杂，直接计算耕地健康产能状况是困难的。因此，本文尝试采用一种简化的方法评价耕地健康产能，即分别评价耕地健康与耕地产能状况，并通过耦合耕地健康与产能分析耕地利用合理程度与生产能力之间的相互作用特征。其中耕地健康状况强调从不同方面评价人对耕地利用的适宜程度并体现区域耕地不合理利用的主导因素。在此基础上，本文根据标准耕作制度<sup>[47]</sup>差异在全国范围选取 65 个县（市）作为研究区域，从地形特征、土壤性状、耕作条件、环境状况和生物特性 5 个维度梳理影响耕地健康的关键因子并评价耕地健康状况，综合区域气候条件、耕地自然条件与耕作技术水平评价耕地产能水平，并分析区域耕地健康-耕地产能作用特征，以期为不同区域耕地资源保护路径设计提供支持。

## 1 方法

### 1.1 耕地健康评价方法

耕地健康格局由包含土壤结构、耕作技术、土壤养分含量、污染状况、生物群落状态等在内的多因素间复杂相互作用形成，并且这种复杂相互作用可能由于区域水热条件与自然-社会-经济格局差异而表现出不同的特征。因此，耕地健康保护与提升需要厘清影响耕地可持续利用的关键因素。本文耕地健康评价在

温良友<sup>[48-49]</sup>等耕地质量评价体系基础上面向不同区域分异特征梳理修正评价指标(表1),应用地形特征系数、土壤性状系数、耕作条件系数、环境状况系数和生物特性系数5类指标表达人对耕地利用的合理程度,评价单元为耕地地块图斑。其中,地形特征旨在从地形形态对水肥供给与运移的影响角度评价耕地地理位

置的合理度;土壤性状综合体现耕地土壤的物理和化学特性对作物生长的适宜性;耕作条件体现人对耕地进行的基础设施建设和改造状况;环境状况表达耕地面临的污染程度;生物特性表达耕地利用对动物健康生长的影响,应用物种指示方法<sup>[50]</sup>,通过单位面积土壤蚯蚓数量计算。

表1 耕地健康评价指标体系(除环境状况)与赋分规则  
Table 1 Cultivated land health evaluation indicator system (except environmental condition) and scoring rules

指标 Indicator	因子 Factor	分值 Value								
		100	90	80	70	60	50	40	30	20
地形特征 Topographic feature $G \in [0,100]$	地形部位	宽谷盆地、平原阶地、河流低谷地、台地等	山地中下部、缓丘坡田、平原湖田等	-	河谷低阶地、丘陵上部、缓岗地、平原洼地、沟谷地等	-	-	山间谷地、丘陵谷地、封闭洼地等	-	-
	田面坡度/(°)	<2	[2, 10)	-	[10, 15]	-	-	[15, 25]	-	-
	有效土层厚度/cm	≥150	[100, 150)	-	[60, 100)	-	[30, 60)	-	<30	-
	有机质含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	≥40	[30, 40)	[20, 30)	[10, 20)	[6, 10)	<6	-	-	-
	耕层质地	壤土	-	黏土	砂土	-	-	砾质土	-	-
	障碍层距地表深度/cm	[60~90]	-	[30, 60)	-	<30	-	-	-	-
土壤性状 <sup>a</sup> Soil properties $S \in [0,100]$	土体构型	通体壤、壤/砂/壤	壤/黏/壤	-	砂/黏/砂、壤/黏/黏、壤/砂/砂	砂/黏/黏	黏/砂/黏、通体黏、黏/砂/砂	通体砂、通体砾	-	-
	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	[1~1.25)	<1 或 [1.25, 1.35)	-	[1.35, 1.45)	-	[1.45, 1.55]	-	>1.55	-
	土壤养分元素	$C_{\text{养综}} \geq 90$	$90 > C_{\text{养综}} \geq 75$	-	$75 > C_{\text{养综}} \geq 60$	-	$60 > C_{\text{养综}} \geq 45$	-	$C_{\text{养综}} < 45$	-
	土壤 pH 值	6.0~7.9	5.5~6.0/7.9~8.5	-	5.0~5.5/8.5~9.0	-	4.5~5.0	-	<4.5/9.0~9.5	≥9.5
	土壤性状 <sup>b</sup> Soil properties $S \in [0,100]$	地表岩石露头度	<2%	[2%, 10%)	-	[10%, 25%)	-	-	≥25%	-
耕作条件 <sup>a</sup> Tillage conditions $C \in [0,100]$	砾石特征	非砾质土	-	-	砾质土	-	轻砾石土	中砾石土	重砾石土	-
	盐渍化程度	无盐化	轻度盐化	-	中度盐化	-	-	重度盐化	-	-
	黑土层厚度/cm	≥50	[30, 50)	-	[10, 30)	-	-	<10	-	-
	灌溉保证程度	充分满足	基本满足	-	一般满足	-	-	无灌溉条件	-	-
耕作条件 <sup>b</sup> Tillage conditions $C \in [0,100]$	排水条件	健全	基本健全	-	一般	-	-	无排水体系	-	-
	田块规整度* <sup>1</sup>	≤2	-	(2, 4]	-	(4, 6]	-	>6	-	-
	道路通达度/%	≥80	-	[60, 80)	-	[40, 60)	-	<40	-	-
耕作条件 <sup>b</sup> Tillage conditions $C \in [0,100]$	耕作距离/m	≤100	(100, 1 000]	-	(1 000, 2 000]	-	-	>2 000	-	-
	田间输水方式	管道输水	-	-	防渗渠道输水	-	土渠输水	-	-	-
	林网化程度	程度高	-	-	程度一般	-	-	-	程度低	-
生物特性 Biological characteristics $B \in [0,1]$	农田防洪标准	≥20年1遇	[10, 20)年1遇	-	[5, 10)年1遇	-	-	<5年1遇	-	-
	土壤蚯蚓数量/(条·m <sup>-3</sup> )	≥20	[15, 20)	-	[10, 15)	-	[5, 10)	-	<5	-

注: <sup>a</sup>和<sup>b</sup>分别表示此类特征的全国必选因子和区域备选因子;  $C_{\text{养综}} = \sum_{i=1}^3 K_i f_i$ , 其中  $f_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 表示氮、磷、钾权重系数, 分别为 0.4, 0.4 和 0.2;  $K_i$  表示土壤氮、磷、钾单元素实测含量评分, 评分规则详见[46]; \*<sup>1</sup>田块规整度计算公式为  $p_k / 4\sqrt{\alpha_k}$ ,  $\alpha_k$  表示耕地图斑  $k$  的面积, m<sup>2</sup>;  $p_k$  表示  $k$  的周长, m.

Note: <sup>a</sup> and <sup>b</sup> are required factor and optional factor of own feature respectively;  $C_{\text{养综}} = \sum_{i=1}^3 K_i f_i$ ,  $f_i$  is weight coefficient of nitrogen, phosphorus and potassium, and their values are 0.4, 0.4 and 0.2 respectively;  $K_i$  is the score of measured nitrogen, phosphorus and potassium content, and the scoring rules are shown in reference [46];

\*<sup>1</sup> Calculation formula of plot regularity is  $p_k / 4\sqrt{\alpha_k}$ ,  $\alpha_k$  is the area of cultivated land figure spot  $k$ , m<sup>2</sup>;  $p_k$  is the perimeter of  $k$ , m.

在实际评价过程中,本研究首先依据区域水热条件,以“不损伤耕地利用可持续性前提下最大限度发挥耕地生产潜力”为标准制定不同县区的适宜种植制度<sup>[47]</sup>。随后应用德尔菲法针对不同二级分区遴选区域备选因子并

设计各评价因子权重与评价指标权重;同时我们预先结合经验知识定义各评价因子的评分规则(表1),以将不同量纲的评价因子观测/调查数据转换到同一标准<sup>[51-52]</sup>。其中地形特征,土壤性状与耕作条件通过评价因子加权

平均计算；环境状况系数计算在应用单项污染指数法分别评价土壤与灌溉水中某种元素的污染程度基础上采用“ $1+P_{\pm}+P_{水}$ ”累加模型突出高浓度污染元素对耕地环境的影响。如式（1）所示

$$\begin{cases} P_{\pm} = \min(P_{v,i}); P_{\pm i} = C_{\pm i} / S_{\pm i}; \\ P_{水} = \min(P_{v,j}); P_{水j} = C_{水j} / S_{水j} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_{\pm}$  和  $P_{水}$  分别为土壤重金属污染与灌溉水环境影响系数； $C_{\pm i}$  表示《土壤环境质量标准 GB15618—2008》<sup>[53]</sup> 中砷 (As)、铬 (Cr)、镉 (Cd)、铜 (Cu)、汞 (Hg)、铅 (Pb)、镍 (Ni) 和锌 (Zn) 8 个重金属元素指标  $i$  的实测含量, mg/kg;  $S_{\pm i}$  则为 GB15618 中规定的相应指标  $i$  的标准值, mg/kg;  $P_{v,i}$  表示  $P_{\pm i}$  对应分值 (表 2), 当  $P_{\pm i}$  小于或等于 1 时, 评价指标  $i$  符合标准, 等级为 1 级,  $P_{v,i}$  为 0; 当  $P_{\pm i}$  大于 1 时, 指标  $i$  含量高于 GB15618 标准值,  $P_{v,i}$  随着  $P_{\pm i}$  增大而减小;  $P_{\pm}$  取值为  $P_{v,i}$  最小值, 且当  $P_{\pm i}$  大于 5 时耕地退出使用, 环境状况系数为 0。同理,  $C_{水j}$  与  $S_{水j}$  分别表示《农田灌溉水质标准 GB5084—2005》<sup>[54]</sup> 中水质评价指标  $j$  (例如总砷、六价铬、总镉、总汞、总铅等) 的实测含量与标准值, mg/L, 当  $P_{水j}$  大于 1 时, 指标  $j$  含量高于标准值, 等级为 2 级,  $P_{v,j}$  为 -0.1。生物特性则计算“土壤蚯蚓数量对应分值/100”。

表 2 耕地环境状况评价指标体系与赋分规则

Table 2 Evaluation indicator system and scoring rules of cultivated land environmental condition

因子 Factor	分级 Degree	分值 Value	描述 Description
土壤重金属 Soil heavy metal	1 级	0	清洁, $P_{\pm i} \leq 1$
	2 级	-0.1	轻微污染, $1 < P_{\pm i} \leq 2$
	3 级	-0.2	轻度污染, $2 < P_{\pm i} \leq 3$
	4 级	-0.3	中度污染, $3 < P_{\pm i} \leq 5$
	5 级	-1	重度污染, $P_{\pm i} > 5$
灌溉水环境 Irrigated water environment	1 级	0	符合标准, $P_{水j} \leq 1$
	2 级	-0.1	不符合标准, $P_{水j} > 1$

### 1.2 耕地产能评价方法

耕地产能是指一定时期内一个地区在一定经济技术条件下, 由各生产要素特别是长期要素 (自然条件, 技术条件) 综合投入所形成的、可以稳定实现一定产量的粮食产出能力<sup>[55]</sup>。产量是指实际种植的粮食作物, 在应对作物生长期各种自然、经济、社会、技术条件变化下, 在耕地面积上实现的实际粮食产出数量。从逻辑关系上看, 耕地产能是本, 粮食产量是相。耕地产能是粮食产量的前提和基础, 只有耕地产能得到根本提升和良好保育, 粮食产量才有可能提高。产量是产能的有效释放和挖掘, 产量接近产能或高于产能, 表现为耕地过挖过掘利用; 产量远低于产能, 则表现为耕地利用不足, 如图 1 所示。张晋科等通过对比耕地生产能力与粮食现实产量分析全国耕地利用程度, 提出利用程度高的区域主要分布在东南沿海省份、东北省份以及自然条件差的青海、西藏两省, 而利用低的省份主要分布在中国北部以及南部的云贵高原区<sup>[56]</sup>。

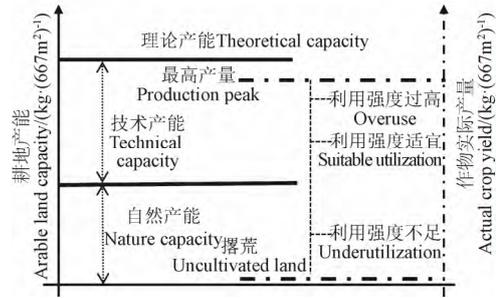


图 1 耕地产能与作物产量关系

Fig.1 Relationship between cultivated land productivity and crop yield

本文耕地产能评价通过综合区域气候条件系数, 耕地自然条件系数与技术水平系数表达天地相互作用形成的耕地生产力水平和产出效果。在实际评价过程中, 本研究一方面以种植制度为参考, 将物候观测数据与气象数据导入 AEZ 模型<sup>[57-58]</sup>, 计算不同县级行政区相关作物对应的光温/气候生产潜力  $\alpha$  与产量比系数  $\beta$ 。其中  $\alpha$  根据耕地灌溉条件区分灌溉农业与雨养农业, 相应计算光温生产潜力或气候生产潜力, 并应用试验田产量数据修正;  $\beta$  用于将不同作物的单产转换到同一种作物。另一方面应用德尔菲法遴选区域备选因子并设计各评价因子权重 (表 3), 并预先定义各评价因子的评分规则 (表 1), 以将不同量纲的评价因子观测/调查数据转换到同一标准。耕地产能指数计算公式如下

$$P = \frac{\sum_{\varepsilon=1}^n \alpha_{\varepsilon} \beta_{\varepsilon}}{m} MT \quad (2)$$

式中  $P$  为耕地产能指数;  $M$  为耕地自然条件系数;  $T$  为技术水平系数;  $m$ 、 $n$  对应评价单元熟制 (例如二年三熟, 则  $m=2$ ,  $n=3$ ),  $\varepsilon$  表示评价单元对应的若干种作物类型。

表 3 耕地产能评价指标体系

Table 3 Cultivated land productivity evaluation indicator system

指标 Indicator	评价因子 Factor	
	全国必选因子 Required factor	区域备选因子 Optional factor
气候条件 Climatic conditions	光温生产潜力/气候生产潜力 $\alpha$	
	作物产量比系数 $\beta$	
自然条件 Natural condition $M \in [0,1]$	地形部位	
	田面坡度	
	有效土层厚度	
	有机质含量	地表岩石露头度
	耕层质地	砾石特征
	障碍层距地表深度	盐渍化程度
	土体构型	黑土层厚度
	土壤容重	
	土壤养分元素	
	pH 值	
	技术水平 Technical level $T \in [0,1]$	灌溉保证程度
排水条件		
农田防洪标准		梯田化水平
灾害防治水平		
农机化水平		
农艺管理水平		

## 2 试验数据

本文研究基于自然资源部“耕地质量调查监测评价”试点工程开展,研究区的选择综合考虑省级行政区划与标准制度分区的影响,覆盖全国29个省份的65个试点县(每个省2~3个),涉及全国12个标准制度一级分区,总耕地面积近468.4万 $\text{hm}^2$ 。在此基础上,本文以县级行政区为单元分别统计耕地健康指标,耕地产能指数的面积加权平均值 $\bar{K}_\lambda$ 与标准差 $Kstd_\lambda$ ,如式(3)和式(4)所示。在数据来源方面,土壤性状相关评价因子主要来自县级测土配方施肥数据、县级土壤普查数据、县级耕地地力评价成果数据等;环境状况相关评价因子主要来自环保部门水质监测数据、国土部门地球化学调查数据等;耕地图斑与耕作条件相关评价因子主要来自全国耕地质量等级调查与评定成果数据;地形部位和田面坡度计算主要依据ASTER GDEM V2(global digital elevation model) 30 m分辨率空间数据集(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn))。

$$\bar{K}_\lambda = \frac{\sum_{\theta=1}^n K_\theta L_\theta}{\sum_{\theta=1}^n L_\theta} \quad (3)$$

$$Kstd_\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{\theta=1}^n [L_\theta \cdot (K_\theta - \bar{K}_\lambda)^2]}{1 + \sum_{\theta=1}^n L_\lambda}} \quad (4)$$

式中 $K_\theta$ 表示县级行政单元 $\lambda$ 内部耕地地块 $\theta$ 对应的某

指数(或评价指标) $K$ 的计算结果; $L_\theta$ 为耕地地块 $\theta$ 的面积; $n$ 表示地块数量;对于环境状况系数与生物特性系数取 $K_\theta * 100$ 。

## 3 试验与分析

### 3.1 耕地健康格局分析

本文尝试从5种评价指标维度,分析限制耕地健康的关键因素。图2a~2e分别列出了县级地形特征系数、土壤性状系数、耕作条件系数、环境状况系数与生物特性系数平均值与其相应标准差的相关性特征。如图所示,一方面,各系数平均值与标准差无显著的线性相关特征, $R^2$ 均小于0.48;另一方面,随着平均值增大,各系数标准差均趋于减小,这表明对于某种系数平均水平较高的试点县,其县内不同耕地地块对应的该系数的离散程度低,表现出更高的一致性。在此基础上,本文将这种标准差收敛特征与各评价因子的评分规则相结合,定义各系数的临界健康阈值与临界亚健康阈值,如图2f所示。以耕作条件系数为例,其平均值大于75的样点,相应标准差显著收敛,样点分布表现出更高的聚集特征(即高频特征);并且随着平均值减小,样点频率逐渐降低,高频数据与低频数据在平均值约为50处产生间断(这种间断可以视为自然分类法的基础<sup>[59]</sup>);此外,相关评分规则中应用分值80(或90)表征评价因子较好状态,分值60(或70)表征中等状态,分值40(或50)表征较差状态;综上,本文定义耕作条件系数的临界健康阈值为75,临界亚健康阈值为50。

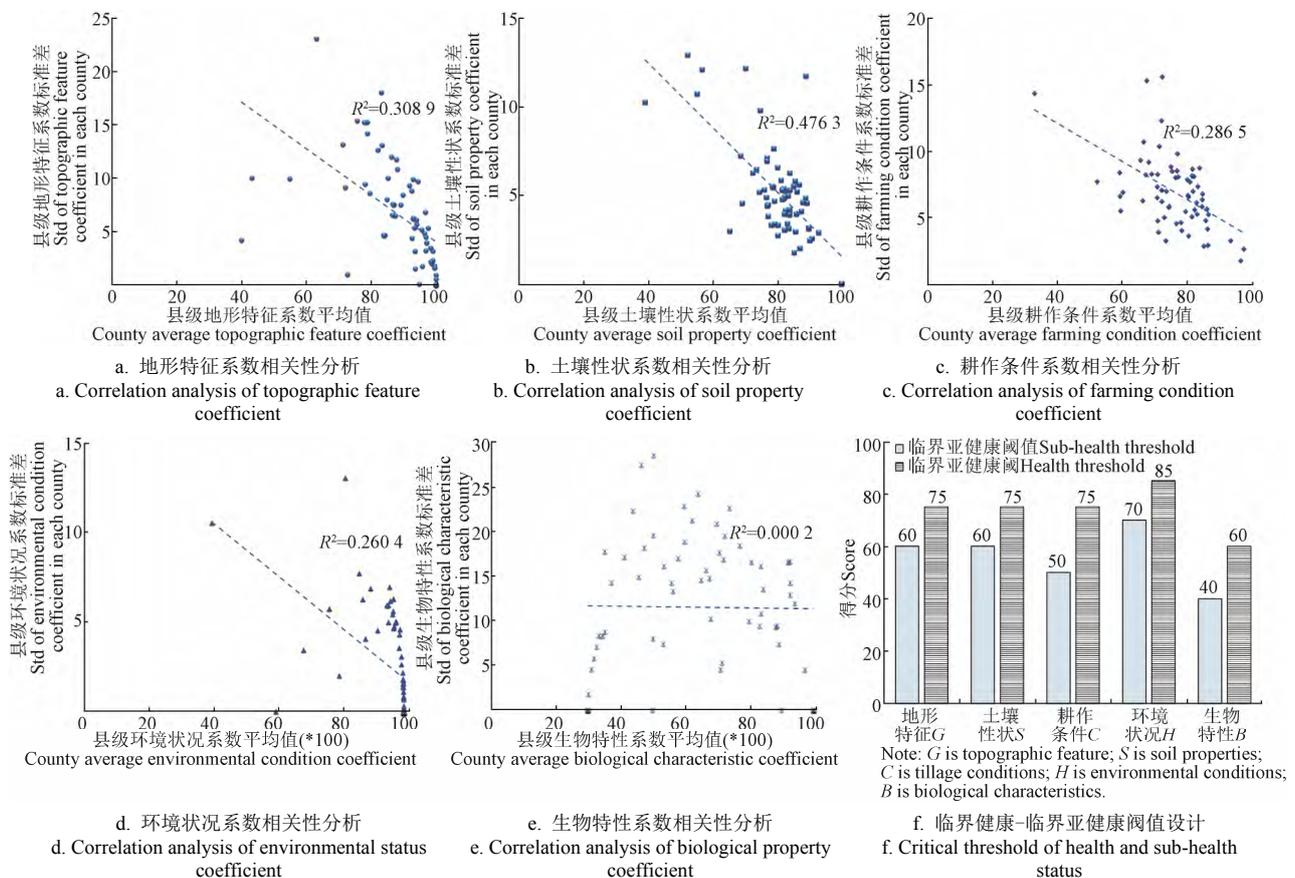


图2 评价指标平均值与标准差相关性特征及健康-亚健康状况阈值设计

Fig.2 Correlation characteristics between mean value and standard deviation of evaluation indicators and critical threshold of health and sub-health status

如图 3 所示，本文依据临界健康阈值与临界亚健康阈值将试点县划分为健康 (A 类)，亚健康 (B 类) 与不健康 (C 类) 3 类，对于 5 种系数均大于 (或等于) 临界健康阈值的试点县归于 A 类；对于存在一个或多个系数小于临界亚健康阈值的试点县归于 C 类，其它则归于 B 类。对于 A 类试点县，影响耕地可持续利用的关键因素均处于良好水平，耕地安全在一定时期内得以保障；对于 B 类试点县，部分因素由于耕地不合理利用而逐渐退化并成为耕地健康隐患，应侧重厘清制约耕地利用的短板与驱动因子，及其预防与提升策略；对于 C 类试点县，耕地健康面临严重威胁，应以治理为主，通过土地整治工程与减小耕地利用强度 (例如休耕) 等方法改善耕地健康状况，并加强耕地健康评价指标监测。在空间分布特征方面，A 类与 B 类试点县多分布在中国东部地区，例如长江中下游区，江南区，东北区以及黄淮海区等；其中 A 类试点县集中分布在东部平原地区，如黄淮平原，江淮平原，沿江平原，松嫩平原等；C 类试点县横跨中国北部地区，在云贵高原与四川盆地交界地带以及南部沿海地区也存在样例，并且相关地形显著为山地或丘陵；而 B 类试点县作为 A 类与 C 类间的过渡类型，分布最为广泛，在山地地区与平原区均有样例。

图 4a~4c 分别展示 3 类试点县对应的评价指标分布特征，图 4d 则统计不同评价指标健康、亚健康以及不健康状态对应的试点县数量。如图所示，不同试点县限制耕地健康的关键要素表现出显著区域性特征，耕地健康保护路径研究需要面向区域实际“短板”问题。对于不同类型试点县，生物特性系数分布离散程度均显著高于其它评价指标；大部分 B 类试点县的“短板”在于生物特性系数与耕作条件系数，其它评价指标基本处于健康状态；而大部分 C 类试点县的生物特性系数低于亚健康临界阈值，其它评价指标低于亚健康临界阈值的现象很少。由图 4d 可见，本研究中存在地形特征、土壤性状与环境状况处于亚健康或不健康状态的试点县样例，但这

种现象并不普遍。比较而言，一方面，耕作条件的亚健康状况更为普遍，表现为耕地破碎化严重以及农田基础设施不完善，也反映出高标准农田建设的迫切需求。另一方面，生物特性形式严峻，表明耕地保障动物健康生长的能力正面临退化，这可能与近 40a 来耕地利用强度持续加大，农药、化肥、除草剂大量使用，农机装备趋于中重型，缺乏深耕细作及土壤有机质含量下降有关，也与蚯蚓数量区域分异特征以及缺乏长期观测实践经验有一定联系。此外，通过土地平整、规模化经营、加强基础设施建设等能够在较长期间内有效提升并维持耕作条件水平，而生物特性状况面临成因复杂、观测体系不完善、改良困难、变化性强等难题，亟需进一步完善评价指标与观测评价方法，加强多因素综合作用过程认知研究。

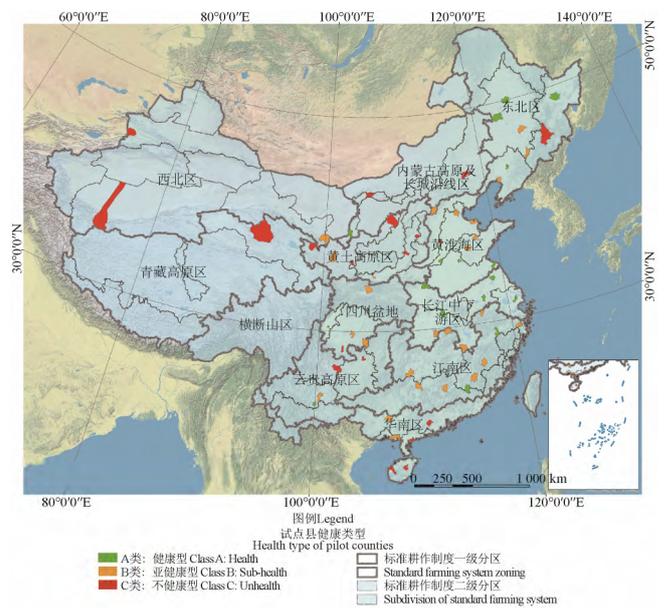


图 3 试点县健康-亚健康-不健康类型空间分布特征  
Fig.3 Spatial distribution characteristics of health, sub-health and unhealthy counties

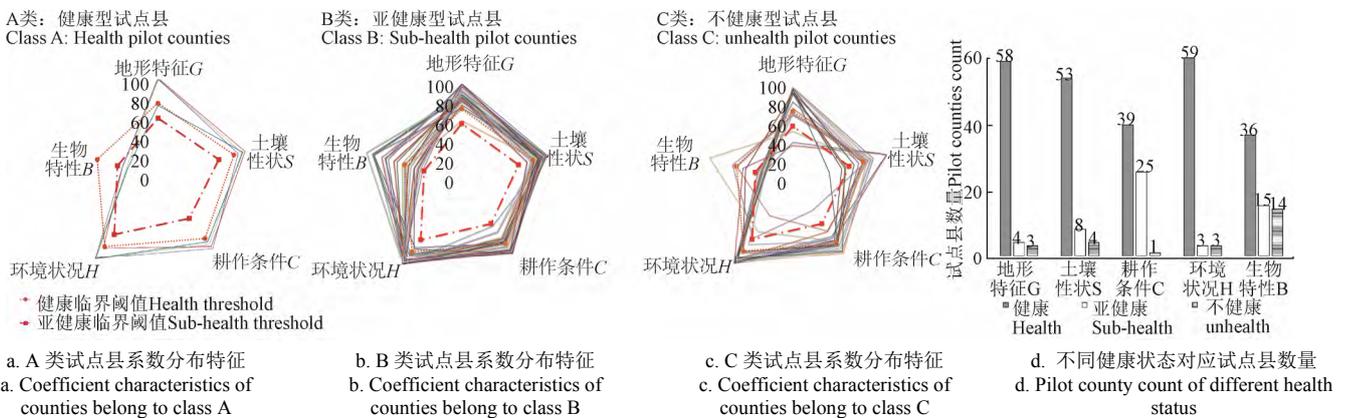


图 4 不同类型试点县系数分布特征与数量分布特征  
Fig.4 Coefficients and quantity distribution characteristics of pilot counties with different types

### 3.2 耕地产能格局分析

本文应用式 (2)，以耕地地块为单元，综合气候条件、耕地自然条件与技术水平计算耕地产能指数  $P$ ；在此基础上应用式 (3) 和式 (4) 统计县级耕地产能

平均值  $\bar{P}$ ，并计算全部试点县耕地产能面积加权平均值  $\theta$  作为耕地高-低产能分级的阈值 (经计算， $\theta = 1533.1$ )。根据试点县耕地高-低产能格局 (图 5)，受气候因素影响，中国耕地产能整体呈东南高 ( $\bar{P} > \theta$ ) - 西北低

( $\bar{P} < \delta$ ) 分布格局; 受社会经济因素影响, 东部黄淮海区、长江中下游区、江南区、华南区、东北区的耕地利用技术水平整体高于西部云贵高原区、四川盆地、黄土高原区及青藏高原区, 但在海南、湖南等省的部分试点县存在技术水平不足的现象。而自然条件较低的试点县在全局呈离散分布, 并未表现出显著空间聚集特征。

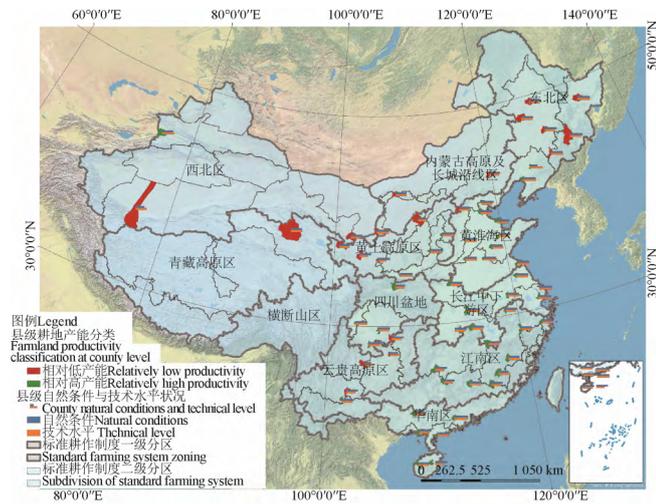


图5 试点县耕地产能格局

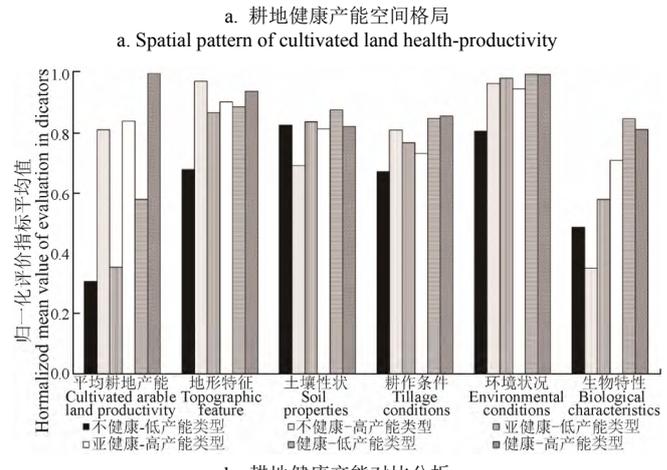
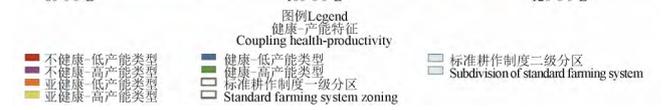
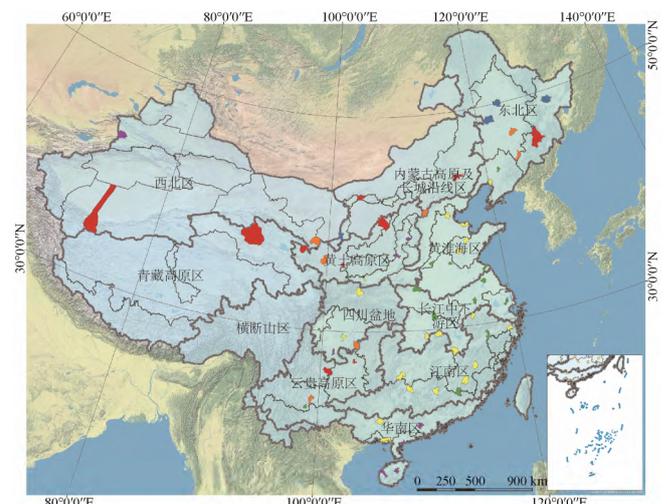
Fig.5 Spatial pattern of cultivated land productivity in pilot counties

### 3.3 耕地健康-产能耦合分析

耕地健康与耕地产能各有侧重又紧密联系: 一方面, 耕地健康侧重体现区域耕地不合理利用的主导因素, 耕地产能则侧重刻画天地综合作用形成的耕地生产力水平; 另一方面, 耕地健康是影响耕地产能的重要因素, 不健康的耕地往往较大程度上限制作物生长过程对区域水-热-肥条件的利用, 而对耕地产能的过度挖掘也易于引发耕地健康问题。因此分析耕地健康与耕地产能的关联特征, 对认知区域耕地保护的重点方向具有重要参考作用。

本文通过建立耕地健康类型与耕地产能指数  $P$  的组合关系, 将试点县耕地健康产能特征划分为“健康-高产能”、“健康-低产能”、“亚健康-高产能”、“亚健康-低产能”、“不健康-高产能”、“不健康-低产能”6类, 并统计不同类型试点县对应归一化耕地平均产能以及地形特征、土壤性状、耕作条件、环境状况、生物特性平均值, 如图6所示。对比统计结果, 健康(-低产能/高产能)类耕地相较于同等产能水平的不健康、亚健康耕地显著表现出更高的平均产能, 反映出耕地健康对耕地产能的正向促进作用; 健康/亚健康-高/低产能4种类型试点县对于生物特性指标差异大, 而对其他4项指标差异较小, 反映出生物特性指标对耕地健康-产能耦合关系的指示性作用; 相比不健康-低产能类型, 不健康-高产能类型的土壤性状与生物特性水平更低, 反映出不健康状态下产能高的耕地面临更大的退化风险。此外, 不健康-低产能类型的地形特征, 耕作条件与环境状况均显著较低, 这可能表现出该类耕地无序开垦、投入不足、粗放利用的问题。“健康-高产能”地区在长江

中下游及黄淮海南部地区形成聚集, 是中国粮食核心产区的重要体现, 同时也是重点防护区域, 需要加强观测以防止耕地过度利用引发土壤、环境、资源、生态等方面问题。“亚健康-高产能”地区具有良好的粮食产出能力, 对于中国粮食安全有重要影响, 是中国实施藏粮于地、藏粮于技战略的关键地带; 但不合理的利用已经危及耕地可持续性, 表现出耕地健康-产能不平衡特征, 因此, 对于这类区域耕地保护的重点方向应兼顾耕地健康与耕地产能, 加强提升耕地健康状况的方法研究与实践, 同时以不恶化健康状况为目标研究合理的耕地利用强度。“不健康-低产能”类型主要分布在中国北部地区, 对于这类区域应重点关注耕地健康修复, 例如通过休耕、轮作等方式修复土壤性状问题严重区域或生态严重退化地区。



a. 耕地健康产能空间格局  
a. Spatial pattern of cultivated land health-productivity

b. 耕地健康产能对比分析  
b. Comparative analysis of cultivated land health-productivity

注: 耕地健康产能类型分别为: 不健康-低产能类型、不健康-高产能类型、亚健康-低产能类型、亚健康-高产能类型、健康-低产能类型、健康-高产能类型。  
Note: Types of cultivated land health-productivity are ill health-low productivity, ill health-high productivity, sub-health-low productivity, sub-health-high productivity, health-low productivity and health-high productivity respectively.

图6 耕地健康产能耦合特征  
Fig.6 Coupling characteristics of cultivated land health-productivity

## 4 讨论

耕地健康产能是耕地自然系统与利用系统综合作用的结果，既包含影响耕地健康格局的自然环境要素和社会经济要素，也包含人类利用导致的不稳定要素。本文在整合已有评价指标体系与评价方法成果基础上，计算全国 65 个试点县影响耕地健康的关键要素格局，并通过耦合耕地健康与耕地产能格局分析两者间相互作用特征，以期为不同区域耕地资源保护路径设计提供信息支持，但仍存在不足：

1) 生物特性状况是气候条件-土壤结构-土壤养分-耕作技术等多因素作用的结果，面临成因复杂、改良困难、变化性强等难题。蚯蚓活动对提高和保持土壤肥力，土壤结构和团聚体稳定性具有重要作用<sup>[60-61]</sup>。实验表明，草地中蚯蚓的缺失增加了土壤容重和抗剪强度，进而大大降低了土壤有机质、土壤水分和入渗率<sup>[62]</sup>。泥浆，氨基无机肥料，酸化肥料，有机磷农药以及高强度耕作均可能对蚯蚓的繁殖或生长产生不利影响<sup>[63-69]</sup>。同时，土壤微生物群落是创造和保持良好土壤结构的关键，例如通过改善通风和腐殖质影响颗粒团聚体的形成。丝状真菌和放线菌尤其能吸附土壤颗粒，使其形成团聚体。此外，细胞外代谢物，如多糖、脂质和蛋白质，具有稳定聚集物的功能<sup>[70-73]</sup>。但由于计算微生物物种多样性的难度，以及解释土壤呼吸测试的难度而应用较少<sup>[74-76]</sup>。此外，研究表明土壤有机碳是土壤生物群落动力学的最佳代表，在农田的肥力、土壤水分有效性和团聚体稳定性方面发挥着关键作用<sup>[77]</sup>。本文从数据易获取性角度考虑，选择土壤蚯蚓数量表征该项指标，存在评价指标单一、观测经验不足、观测体系不完善、观测数据积累较少等不足，因此在未来的研究中亟需进一步加强多因素作用过程认知研究，研究微生物群落、有益微生物种群数等指标作用特征，完善评价指标与观测调查技术。

2) 耕地系统是一个由多种要素组成、组织结构复杂、演化方向多样，具有区域差异特征、区域综合特征的复杂巨系统。以资源可持续利用为目标的耕地健康产能评价研究已经进入系统阶段。传统的多要素加权平均方法沿袭自然科学研究“还原论”经典的思维逻辑，因在很大程度上忽略了要素的内在关联和相互作用关系，不能表达耕地整体特征而逐渐无法满足应用需求<sup>[78-79]</sup>。因此，耕地健康产能评价指标综合方法研究需要在已有数据成果基础上，促发从模式思维向数据思维转变，通过研究评价因子空间分异特征及因子间相互作用过程认知耕地系统变化规律，创建耦合的土地计算方法体系。

3) 在耕地健康评价指标设计方面，本文从地形特征、土壤性状、耕作条件、环境状况和生物特性 5 个方面计算表达人对耕地利用的适宜程度，这与国外土壤健康、土壤质量评价研究侧重土壤物理、化学与生物性质<sup>[80]</sup>是一致的。此外考虑到耕地侵占、破碎化严重、技术水平不足等中国特色问题，本文进一步集成地形特征与耕作

条件方面的评价。本文试点研究表明耕作条件的亚健康状况较为普遍，反映出高标准农田建设的迫切需求。耕地健康内涵丰富，涉及因素众多，例如耕作方式（轮作/保护性耕作/免耕/覆盖作物）、利用强度、水资源承载力、农作物安全、大气环境等均是影响耕地健康的重要因素。后续研究中我们将完善评价指标体系，更全面表达耕地健康状况。

4) 在评价因子数据获取方面，本研究以县级行政区为单元开展评价研究，相关数据多来源于已有资料成果（例如县级土壤普查成果、县级地球化学调查成果、县级耕地质量等级评价成果、县级水利普查数据等），存在数据年份不一致的现象；少量数据来源于实地采样检测或外业调查（例如土壤理化性质检测，灌溉保障程度外业调查等），存在数据采集人工成本高、数据更新周期长等问题；此外，部分评价因子（例如灾害防治水平和农艺管理水平）的判定标准以定性描述为主，数据采集难度大，并受外业人员主观认识、知识水平及对当地情况了解程度影响较大，不利于调查成果的横向对比。因此，需要进一步研究基于遥感与地面传感网络的评价因子数据采集获取方法与技术<sup>[81-84]</sup>，发展满足客观快速观测需求的评价因子指标体系，加强数据获取准确性、时效性与统一可比性。

5) 阈值确定是国内外生态系统健康、土壤健康、土壤质量等方面研究广泛面临的难题。相关方法包括基于专业知识的德尔菲法，基于指标空间格局的多项式拟合方法<sup>[85]</sup>以及基于长期观测数据的机理模型方法<sup>[86]</sup>，其中机理模型方法最为客观，但由于机理过程复杂在实际应用中往往针对单个评价因子，在多因子综合研究中难以应用。本文对于耕地健康-亚健康临界阈值确定尝试采用将前两种方法相结合，以专家知识为主导并应用指标标准差收敛特征修正，目的是将地块尺度的因子内在属性评分与县域尺度指标一致性特征结合，但由于缺乏机理模型而存在可解释性不足的问题。因此，在未来亟需进一步加强评价指标状态-压力-响应过程研究，发展耕地健康评价阈值确定方法。

## 5 结论

本文以全国范围 65 个县（市）作为研究区域，应用地形特征、土壤性状、耕作条件、环境状况和生物特性 5 类指标整合影响耕地健康的关键因素并评价耕地健康状况，在此基础上通过分析指标标准差收敛特征与评价因子的评分规则，定义各指标的临界健康阈值与临界亚健康阈值，将试点县划分为健康、亚健康与不健康 3 类，进而分析不同健康状况的分布特征。同时，综合区域气候条件、耕地自然条件与耕作技术水平评价耕地产能水平，并分析研究区域耕地健康-耕地产能作用特征。研究表明，试点县耕地亚健康及不健康类型表现出显著区域性特征，不同试点县限制耕地健康的关键要素存在差异；一方面，耕作条件的亚健康状况更为普遍，表现为耕地破碎化严重以及农田基础设施不完善，也反映出高标准农田建设的迫切需求；另一方面，生物特性形式严峻，

表明在气候条件-土壤结构-耕作方式等因素相互作用下耕地保障动物健康生长的能力正面临退化。此外,通过耕地健康与耕地产能耦合分析,本文将试点县耕地健康产能特征划分为“健康-高产能”、“健康-低产能”、“亚健康-高产能”、“亚健康-低产能”、“不健康-高产能”、“不健康-低产能”6类,并分析不同类型区域耕地保护的重点方向。

致 谢

感谢张凤荣,孔祥斌,吴克宁,高培超,沈石对本文指标体系的讨论与建议。感谢北京师范大学地理科学学部地理数据与应用分析中心地学高性能计算平台支持[https://gda.bnu.edu.cn/]。

#### [参 考 文 献]

- [1] Rosegrant M W, Cline S A. Global food security: Challenges and policies[J]. *Science*, 2003(302): 1917—1919.
- [2] Food and Agriculture Organization (FAO). The State of Food Insecurity in the World[R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 2012.
- [3] Alexandratos N, Bruinsma J. World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 Revision[R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 2012.
- [4] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 20260—20264.
- [5] IPCC. Climate Change and Land[R]. (2019-06-12) [2019-07-28] <https://www.ipcc.ch/report/srcl/>.
- [6] Valujeva K, O'Sullivan L, Gutzler C, et al. The challenge of managing soil functions at multiple scales: An optimisation study of the synergistic and antagonistic trade-offs between soil functions in Ireland[J]. *Land Use Policy*, 2016, 58: 335—347.
- [7] Coyle C, Creamer R E, Schulte R P O, et al. A functional land management conceptual framework under soil drainage and land use scenarios[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 56: 39—48.
- [8] Brown L. Who will Feed China? Wake-up Call for a Small Planet[M]. New York: WW Norton & Company, 1995.
- [9] Un, United Nations. The Millennium Development Goals Report 2015 [J]. *Agenda*, 2015, 23(81): 155-157.
- [10] Deng X Z, Huang J K, Rozelle S, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China[J]. *Land Use Policy*, 2015(5): 1—7.
- [11] 刘霏珈, 吴克宁, 罗明, 等. 农用地土壤重金属超标评价与安全利用分区[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 254—262.  
Liu Peijia, Wu Kening, Luo Ming, et al. Evaluation of agricultural land soil heavy metal elements exceed standards and safe utilization zones[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(23): 254—262. (in Chinese with English abstract)
- [12] 范昊明, 蔡强国, 陈光, 等. 世界三大黑土区水土流失与防治比较分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 387—393.  
Fan Haoming, Cai Qianguo, Chen Guang, et al. Comparative study of the soil erosion and control in the three major black soil regions in the world[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 387—393. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 1983—2009年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 254—262.  
Zhao Yeting, Chang Qingrui, Li Zhipeng, et al. Spatial characteristics and changes of soil organic matter for cultivated land in suburban area of Xi'an from 1983 to 2009[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(2): 254—262. (in Chinese with English abstract)
- [14] Leegood R C, Evans J R, Furbank R T. Food security requires genetic advances to increase farm yield[J]. *Nature*, 2010, 464(7290): 831.
- [15] Leopold A. Wilderness as land laboratory[J]. *Living Wilderness*, 1941, 6(2): 3.
- [16] Rapport D J, McCullum J, Miller M H. Soil health: Its relationship to ecosystem health[C]. // *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford: CAB International, 1997: 29—47.
- [17] Sparling G P. Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health[C]// *Biological Indicators of Soil Health*. Wallingford: CAB International, 1997: 97—119.
- [18] Hodgson J. *Grazing Management: Science into Practice*[M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1990.
- [19] Kumar S, Garg A K, Aulakh M S. Effect of conservation agriculture practices on physical, chemical and biological attributes of soil health under soybean-rapeseed rotation[J]. *Agricultural Research*, 2016, 5(2): 145—161.
- [20] Rapport D J. What constitutes ecosystem health?[J]. *Perspectives in Biology & Medicine*, 1989, 33(1): 120—132.
- [21] Rapport D J, Buckingham D, Cairns J, et al. Ecosystem

- health: The concept, the ISEH and the important tasks ahead[J]. *Ecosystem Health*, 1999, 5(2): 82—90.
- [22] Costanza R, Norton B G, Haskell B J. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*[M]. Washington DC: Island Press, 1992.
- [23] 伍育鹏, 鄢文聚, 邹如. 耕地产能核算模型的研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 108—113.
- Wu Yupeng, Yun Wenju, Zou Ru. Model for calculation of cultivated land arable[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(2): 108—113. (in Chinese with English abstract)
- [24] 伍育鹏, 鄢文聚, 邹如. 基于耕地质量评价的耕地产能核算方法及分布[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 85—89.
- Wu Yupeng, Yun Wenju, Zou Ru. Productivity calculation methods and distribution regulation based on cultivated land quality appraisal[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(1): 85—89. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王洪波, 鄢文聚, 吴次芳, 等. 基于农用地分等的耕地产能监测体系研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4): 122—126.
- Wang Hongbo, Yun Wenju, Wu Cifang, et al. Farmland productivity monitoring system based on farmland gradation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(4): 122—126. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张红富, 周生路, 吴绍华, 等. 省域尺度耕地产能空间分异规律及其影响因子[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 308—314.
- Zhang Hongfu, Zhou Shenglu, Wu Shaohua, et al. Provincial scale spatial variation of cultivated land production capacity and its impact factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(8): 308—314. (in Chinese with English abstract)
- [27] 叶兴庆. “健康产能”的增长如何跑赢“有毒产能”的退出[J]. *中国发展观察*, 2014(2): 10—11.
- [28] 李强, 严金明, 赵焯. 耕地健康也需诊断[J]. *中国土地*, 2011(11): 37—39.
- [29] 李强, 彭文英, 王建强, 等. 乡镇企业发达区耕地健康评价与驱动机理研究[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1499—1510.
- Li Qiang, Peng Wenying, Wang Jianqiang, et al. Health assessment and driving mechanism analysis of cultivated land in the township enterprises developed region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(9): 1499—1510. (in Chinese with English abstract)
- [30] 鄢文聚, 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.
- [31] Klingebiel A A, Montgomery P H. *Land Capability Classification*[M]. US Department of Agriculture Handbook. 1961: 210.
- [32] Food and Agriculture Organization (FAO). *A Framework for Land Evaluation*[R]. FAO Soil Bulletin, 32, Rome. 1976.
- [33] Food and Agriculture Organization (FAO). *Report on the Agro-Ecological Zones Project*[R]. Rome: World Soil Resources Reports, 1978.
- [34] Food and Agriculture Organization (FAO). *Guidelines: Land Evaluation for Rainfed Agriculture*[R]. Rome: FAO Soil Bulletin, 1983.
- [35] Food and Agriculture Organization (FAO). *Guidelines: Land Evaluation for irrigated Agriculture*[R]. Rome: FAO Soil Bulletin, 1985.
- [36] 傅伯杰, 陈利顶, 马诚. 土地可持续利用评价的指标体系与方法[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 113—118.
- Fu Bojie, Chen Liding, Ma Cheng. The index system and method of land sustainable use evaluation[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 113—118. (in Chinese with English abstract)
- [37] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1885—1892.
- Fu Bojie, Liu Shiliang, Ma Keming. The contents and methods of integrated ecosystem assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1885—1892. (in Chinese with English abstract)
- [38] Acton D F. A program to assess and monitor soil quality in Canada[J]. *Research Branch, Agriculture Canada*, 1994: 5—8.
- [39] Food and Agriculture Organization (FAO). *FESLM: An international Framework for evaluating sustainable land management*[R]. Rome: World Soil Resources Report No. 73, 1993.
- [40] 盛丰. 康奈尔土壤健康评价系统及其应用[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1289—1296.
- Sheng Feng. Introduction and application of cornell soil health assessment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(6): 1289—1296.
- [41] Vincent D P O, Lal R. A standardized soil quality index for

- diverse field conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 424—434.
- [42] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000(15): 3—11.
- [43] The Nature Conservancy. Rethink Soil: A Roadmap to U. S. Soil Health[EB/OL]. (2017-03-23)[2019-07-28] www.nature.org/soil.
- [44] 耕地地力调查与质量评价技术规程: NY/T1634—2008[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2008.
- [45] 农用地质量分等规程: GB28407—2012[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2012.
- [46] 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国地质调查局, 2016.
- [47] 安萍莉, 张凤荣, 陈阜. 农用地分等定级中标准耕作制度的确定[J]. *地理与地理信息科学*, 2002, 18(2): 45—48.  
An Pingli, Zhang Fengrong, Chen Fu. Determination of the standard farming system for farmland grading[J]. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(2): 45—48 (in Chinese with English abstract).
- [48] 温良友, 孔祥斌, 张蚌蚌, 等. 基于可持续发展需求的耕地质量评价体系构建与应用[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 234—242  
Wen Liangyou, Kong Xiangbin, Zhang Bangbang, et al. Construction and application of arable land quality evaluation system based on sustainable development demand[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(10): 234—242. (in Chinese with English abstract)
- [49] 郎文聚, 沈重阳. 中国农用地质量发展研究报告(2018)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2018: 19—32.
- [50] 刘焱序, 彭建, 汪安, 等. 生态系统健康研究进展[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 5920—5930.  
Liu Yanxu, Peng Jian, Wang An, et al. New research progress and trends in ecosystem health[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 5920—5930. (in Chinese with English abstract)
- [51] Yao X C, Mokbel M F, Ye S J, et al. Spatial coding-based approach for partitioning big spatial data in Hadoop[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 106: 60—67.
- [52] Ye S J, Zhu D H, Yao X C, et al. Development of a highly flexible mobile GIS-based system for collecting arable land quality data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 5(14): 4432—4441.
- [53] 土壤环境质量标准: GB15618—2008[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [54] 农田灌溉水质标准: GB5084—2005[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2005.
- [55] 郎文聚, 张蕾娜. 如何加强耕地质量保护与建设管理[J]. *中国土地*, 2012(1): 33—34.
- [56] 张晋科, 张凤荣, 张琳, 等. 中国耕地的粮食生产能力与粮食产量对比研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(11): 2278—2285.  
Zhang Jinke, Zhang Fengrong, Zhang Lin, et al. Comparison between the potential grain productivity and the actual grain yield of cultivated lands in mainland China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(11): 2278—2285. (in Chinese with English abstract)
- [57] Albersen P J, Fischer G, Keyzer M A, et al. Estimation of Agricultural Production Relations in the LUC Model for China[M]. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2002.
- [58] Fischer G, Van Velthuisen H, Shah M, et al. Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21st Century: Methodology and Results[M]. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis, 2002.
- [59] Jiang B. Head/Tail Breaks: A New Classification Scheme for Data with a Heavy-Tailed Distribution[J]. *The Professional Geographer*, 2012, 65(3): 482—494.
- [60] Edwards C A, Lofty J R. *Biology of Earthworms*[M] Second ed. London: Chapman and Hall, 1977: 309.
- [61] Marinissen J C Y. Earthworm populations and stability of soil-structure in a silt loam soil of a reclaimed polder in the Netherlands[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1994, 51: 75—87.
- [62] Clements R O, Murray P J. Sturdy the impact of 20 years' absence of earthworms and three levels of N fertilizer on a grassland soil environment[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 1991, 36: 75—85.
- [63] Curry J P. Some effects of animal manures on earthworms in grassland[J]. *Pedobiologia*, 1976, 16: 425—438.
- [64] Lofs-Holmin A. Influence of agricultural practices on earthworms (*Lumbricidae*)[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1983, 33: 225—234.
- [65] Hansen S, Engelstad F. Earthworm populations in a cool and wet district as affected by tractor traffic and fertilisation

- Appl[J]. Applied Soil Ecology, 1999, 13: 237—250.
- [66] Edwards C A, Bohlen P J. The effects of toxic chemicals on earthworms[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 1992, 125: 23—99.
- [67] Ma W C, Brussaard L, Ridder de J A. Long-term effects of nitrogenous fertilizers on grassland earthworms (*Oligochaeta Lumbricidae*): their relation to soil acidification[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1990(30): 71—80.
- [68] Davis BNK. Earthworms their Ecology and Relationships with Soils and Land Use[J]. Environmental Pollution, 1985, 42(1): 94.
- [69] Hugh R, Reidun P, Ragnar E, et al. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 124(3): 275—284.
- [70] Stenberg Bo. Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 1999, 49(1): 1—24.
- [71] Lynch J M. Interactions between biological processes, cultivation and soil structure[J]. Plant and Soil, 1984, 76(1): 307—318.
- [72] Lynch J M, Bragg E. Microorganisms and Soil Aggregate Stability//Stewart B A(eds). Advances in Soil Science. vol 2.[M]. New York: Springer, 1985.
- [73] Gupta V V S R, Germida J J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1988, 20(6): 777—786.
- [74] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 88(2): 153—160.
- [75] Vincent D P O, Lal R. Using meta-analyses to assess pedo-variability under different land uses and soil management in central Ohio, USA[J]. Geoderma, 2014, (232/233/234): 56—68.
- [76] Vincent D P O, Lal R. A standardized soil quality index for diverse field conditions[J]. Science of The Total Environment, 2016, 541: 424—434.
- [77] Mcbratney A, Field D J, Koch A. The dimensions of soil security[J]. Geoderma, 2014, 213: 203—213.
- [78] 宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1204—1213.
- Song Changqing, Cheng Changxiu, Shi Peijun. Geography complexity: New connotations of geography in the new era[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1204—1213. (in Chinese with English abstract)
- [79] 程昌秀, 史培军, 宋长青, 高剑波. 地理大数据为地理复杂性研究提供新机遇[J]. 地理学报, 2018, 73(8): 1397—1406.
- Cheng Changxiu, Shi Peijun, Song Changqing, Gao Jianbo. Geographic big-data: A new opportunity for geography complexity study[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(8): 1397—1406. (in Chinese with English abstract)
- [80] Drobnik T, Greiner L, Keller A, et al. Soil quality indicators-From soil functions to ecosystem services[J]. Ecological Indicators, 2018, 94(1): 151—169.
- [81] 叶思菁. 大数据环境下遥感图谱应用方法研究—以作物干旱监测为例[J]. 测绘学报, 2018, 47(6): 892.
- Ye Sijing. Research on application of remote sensing Tupu: Take monitoring of meteorological disaster for example[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6): 892. (in Chinese with English abstract)
- [82] 叶思菁, 张超, 王媛, 等. GF-1 遥感大数据自动化正射校正系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2017(33): 266—273.
- Ye Sijing, Zhang Chao, Wang Yuan, et al. Design and implementation of automatic orthorectification system based on GF-1 big data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017(33): 266—273. (in Chinese with English abstract)
- [83] Ye Sijing, Yan Tailai, Yue Yanli et al. Developing a reversible rapid coordinate transformation model for the cylindrical projection[J]. Computers & Geosciences, 2016, 89(4): 44—56.
- [84] Ye Sijing, Cheng Changxiu, Song Changqing, et al. RDCRMG: A raster dataset clean & reconstitution multi-grid architecture for remote sensing monitoring of vegetation dryness[J]. Remote Sensing, 2018(10): 1—24.
- [85] Juhos K, Czigány S, Madarász B, et al. Interpretation of soil quality indicators for land suitability assessment-A multivariate approach for Central European arable soils[J]. Ecological Indicators, 2019(99): 261—272.
- [86] Clivot H, Mouny J, Duparque A, et al. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 118: 99—113.

# Cultivated land health-productivity comprehensive evaluation and its pilot evaluation in China

Ye Sijing<sup>1,2</sup>, Song Changqing<sup>1,2</sup>, Cheng Feng<sup>3</sup>, Zhang Leina<sup>3</sup>, Cheng Changxiu<sup>1,2\*</sup>, Zhang Chao<sup>4</sup>,  
Yang Jianyu<sup>4</sup>, Zhu Dehai<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Centre of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 4. Key Laboratory of Agricultural Land Quality (Beijing) Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Evaluation of the healthy productivity of cultivated land in China, analysis of key problems of different regions that endangers cultivated land health is of great significance to explore sustainable cultivated land utilization path and safeguard national food security and ecological security. The evaluation of cultivated land healthy productivity should be executed base on integration of existing evaluation indicators system and evaluation method achievements and clarification of key factor states and driving processes that affecting cultivated land health from the perspective of cultivated land components. And interaction characteristics between cultivated land health and cultivated land productivity should be analyzed by coupling them with each other. In this paper, we selected 65 counties (cities) nationwide as research regions with considering the difference of climate conditions in different regions of China, and used 5 categories of indicators including topographic characteristics, soil properties, tillage conditions, environmental conditions and biological characteristics to present the cultivated land health status. And on that basis, we defined critical health threshold and critical sub-health threshold of different indicators by analyzing counties' indicator standard deviation convergence characteristics and scoring rules. We divided all pilot counties into three statuses: Health, sub-health and unhealth, and analyzed spatial distribution features of counties with different health status. Furthermore, regional climate conditions indicator, cultivated land natural conditions indicator and tillage technique level indicator had been synthetically integrated to evaluate the productivity of cultivated land, and regional cultivated land health-productivity interaction characteristic had been analyzed. Experimental result showed that counties whose cultivated land in sub-healthy or unhealthy status expressed significant regional features, and the key factors of limiting cultivated land health were different among pilot counties. On the one hand, the sub-health status cases caused by inferior farming conditions indicator were more common (accounting for nearly 40% of pilot counties) than other indicators, which was not only manifested by serious fragmentation of cultivated land and imperfect farmland infrastructure, but also reflected the urgent requirement for promoting high-standard farmland construction. On the other hand, the form of biological characteristics was severe, indicating that under the interaction of climatic conditions, soil structure and tillage technology, the ability of cultivated land to guarantee the healthy growth of animals was facing degradation. Furthermore, through coupling analysis of cultivated land health and cultivated land productivity, we divided the cultivated land healthy productivity characteristics of pilot counties into six categories: "health-high productivity", "health-low productivity", "sub-health-high productivity", "sub-health-low productivity", "unhealth-high productivity" and "unhealth-low productivity", and respectively analyzed the regional farmland protection directions for each category. "Sub-health/unhealth-high productivity" type was widely distributed, which was the core region for implementation of "storing grain on land and storing grain in technology" strategy in China. Therefore, it is necessary to give consideration to the health and productivity of cultivated land in this region, and strengthen the research and practice on methods to improve the health of cultivated land. This study provides scientific basis for improving cultivated land healthy productivity and provides effective support for designing protection paths of cultivated land resources in different regions.

**Keywords:** land use; GIS; cultivated land; cultivated land health; cultivated land productivity; climate change