

任向宁, 王璐, 胡月明, 等. 健康视角下我国南亚热带水田粮食产能关键限制因子识别——以广州市从化区为例[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 793–804.

REN Xiang-ning, WANG Lu, HU Yue-ming, et al. Key limiting factors of grain productivity in subtropical southern Chinese paddy fields from a land-health perspective[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 793–804.



开放科学 OSID

健康视角下我国南亚热带水田粮食产能关键限制因子识别 以广州市从化区为例

任向宁^{1,2}, 王璐^{1,3,4*}, 胡月明^{1,2,4,5}, 杨颢^{1,2}, 谢英凯^{1,3,4}, 韦泽棉¹

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广州 510642; 3. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广州 510642; 4. 自然资源部建设用地再开发重点实验室, 广州 510642; 5. 广州市华南自然资源科学技术研究院, 广州 510642)

摘要: 在国际粮食供需环境剧变及国内耕地非农化压力下, 保障国家粮食安全, 保证健康状态下耕地的粮食产能是全社会的重中之重。但是现有的耕地质量认知仍偏重于“自然环境本底”与“投入-产出”作用的耦合效应, 缺乏从健康视角对耕地粮食产能关键限制因子的多维度考量。以广州市从化区为研究区, 在大量样本采样检测和实地调研测产的基础上, 采用地理探测器识别了健康视角下我国南亚热带水田粮食产能关键限制因子。结果表明: 我国南亚热带水田粮食产能受地理环境健康背景、土壤健康状况和农田健康人工环境 3 个健康维度协同影响, 三者贡献力分别为 2.702、2.025 和 1.200, 13 个影响因素贡献力(q 值)介于 0.012~0.865 之间, 36 个影响因子贡献力介于 0.004~0.537 之间。健康视角下我国南亚热带水田粮食产能关键限制因子主要为农田水文条件、土壤物理与微量元素健康状况、土壤侵蚀状况、生产保障措施和人为管理强度中的 7 个因子, 其贡献力介于 0.299~0.537 之间, 贡献力大小依次为: 表土质地>平均水位变化>农作活动频率>土壤侵蚀程度>灌溉保障能力>有效硅含量>灌溉方法。受现代农业种植策略影响, 我国南亚热带水田中土壤肥力、酸碱度和生物健康水平普遍较高, 但土壤有效硅含量严重不足, 基于灌溉保障和灌溉方法的农田精准水环境管理措施也亟需重视。可见, 农田粮食产能的“木桶效应”仍严重威胁粮食安全, 导致粮食产能的不稳定性与空间差异性, 建议高度重视不同土壤类型中的微量元素健康状况及农作物生长过程中水环境的精准管理。

关键词: 健康视角; 中国南亚热带; 水田; 粮食产能; 关键限制因子; 地理探测器

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)06-0793-12

doi: 10.13254/j.jare.2020.0478

Key limiting factors of grain productivity in subtropical southern Chinese paddy fields from a land-health perspective

REN Xiang-ning^{1,2}, WANG Lu^{1,3,4*}, HU Yue-ming^{1,2,4,5}, YANG Hao^{1,2}, XIE Ying-kai^{1,3,4}, WEI Ze-mian¹

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Land Use and Consolidation, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Province Engineering Research Center for Land Information Technology, Guangzhou 510642, China; 4. Key Laboratory of the Ministry of Natural Resources for Construction Land Transformation, Guangzhou 510642, China; 5. South China Academy of Natural Resources Science and Technology, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Ensuring national food security and healthy land for grain production is a priority because of changes to international agricultural supply and demand and domestic non-agricultural commodities. Considerations for cultivated land quality still focus on coupling the "natural environmental background" and "input-output" and lack a multi-dimensional perspective. Paddy field grain productivity in

收稿日期: 2020-08-31 录用日期: 2020-10-21

作者简介: 任向宁(1978—), 男, 河北正定人, 讲师, 研究方向为土地资源开发利用与保护。E-mail: xnren@scau.edu.cn

*通信作者: 王璐 E-mail: selinapple@163.com

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFD0800307); 国家自然科学基金项目(U1901601)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2016YFD0800307); The National Natural Science Foundation of China(U1901601)

<http://www.aed.org.cn>

subtropical southern China (Conghua District, Guangzhou City) was studied to identify the key limiting factors. Sampling, on-site investigations, and production measurements were completed with a Geodetector. The three primary health dimensions that influenced paddy field grain productivity were the geographical environment health background ($q=2.702$), the soil health status ($q=2.025$), and the farmland health artificial environment ($q=1.200$). In total, 36 influencing factors were observed, and the contributions (q values) ranged from 0.004 to 0.537. The key limiting factors were the farmland hydrological conditions, the soil physical and trace element health status, the soil erosion status, the production security measures, and the human management intensity. Their contributions ranged from 0.299 to 0.537 in the following order: soil texture > average water level change > farming activity frequency > soil erosion degree > irrigation support capacity > available silicon content > irrigation method. Using a modern agricultural planting strategy, the soil fertility, pH, and microbial activity health levels were high, but the available silicon content was insufficient. These results suggest that managing the farmland water environment (i. e., irrigation guarantee and irrigation methods) is important. The farmland grain production capacity "barrel effect" continues to threaten food security, leading to instability and spatial differences. Therefore, soil trace elements and water management during crop growth are critical factors for land health.

Keywords: health perspective; subtropical southern China; paddy field; grain productivity; key limiting factors; Geodetector

我国亚热带主要包括广东、广西、福建、云南、海南等地^[1],是我国耕地大面积分布的重要区域,承载近2亿人口的生存和生计。亚热带水田的水热条件优越、复种指数高、粮食年产量大,是保障我国粮食安全的重要土地资源^[2]。改革开放以来,在急剧增加的人口和快速发展的社会经济压力下,亚热带水田利用强度持续增加、生态环境恶化,加之农田土壤在亚热带季风气候下脱硅富铝过程中形成的酸性强、黏重及养分低的显著特点,可持续利用能力受到严重影响,亟需识别目前亚热带耕地产能的关键影响因素^[3-4]。

国内外对耕地产能的研究主要经历了土地自然生产力-光温(气候)生产力-产能、健康综合三个阶段^[5]。国外对耕地产能的研究主要是从土地适宜性评价出发,侧重微观探讨作物的生产潜力,以研究耕地的生产状况。从1840年Liebig^[6-7]提出“最小养分定律”至“限制因子定律”和“收获能量定律”,国外早期研究主要集中在土壤自身属性和作物的自然适宜性对土地自然生产能力的影响。1971年联合国粮农组织(FAO)提出了具有里程碑意义的土壤生产力综合评价指数(PI)模型^[8],1976年提出了农业生态地区法(AEZ),对光温生产潜力进行了深入研究^[9]。土地生产潜力的研究是国外关于耕地产能研究的重点,同时也较为深入地探讨了光照、温度、降水及土壤等自然因子对作物产量的影响机理^[10]。

相对来说,中国人多地少的问题极为突出,国内学术界对耕地的粮食产能研究更为重视。国内学者主要从微观和宏观两个层面上对粮食生产能力进行研究:①微观层面的机理研究,从作物潜在的生产力层面构建单产模型,分析光、温、土、水、气等自然要

素^[11-12],及化肥投入、劳动力投入^[13]、管理水平^[14]等人为要素对耕地粮食产能的作用机制;②宏观层面的研究,把粮食生产能力建立在耕地保护能力、生产技术水平 and 消除限制因子影响的整合基础之上,把粮食生产作为耕地、资本、劳动力和技术等要素综合作用的结果。目前,国内学者在河南^[15]、黑龙江^[16]、吉林^[17]、河北^[18]及四川^[19]等黑土、褐土、红黄壤区,就耕地粮食产能的关键限制因子开展了大量的研究,且取得了一系列成果。但是针对亚热带进行的耕地产能限制因子研究主要集中在施肥类型^[20]、数量^[21]及施肥方式^[22-24]对耕地粮食产能的作用机制,缺乏从健康角度出发,在中大空间尺度下对多维度的关键限制因子识别,特别是对现阶段水田土壤健康状况等方面的关键限制因子亟需进一步明晰。

因此,本研究以广州市从化区为研究区,基于文献法构建健康视角下我国亚热带水田粮食产能影响因素体系,以样点粮食年产量为因变量,采用地理探测器测度各影响因子贡献力,进而识别关键限制因子,为科学保护和提升农田粮食产能、消除其不稳定性与空间差异性奠定科学基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于广东省广州市从化区,地处 $23^{\circ}22' \sim 23^{\circ}56' \text{N}$ 、 $113^{\circ}17' \sim 114^{\circ}04' \text{E}$ 之间,北回归线横穿研究区,面积 $1\,984 \text{ km}^2$,属典型亚热带地区(图1)。研究区地貌复杂,地势从北向南倾斜,东北高,西南低,地形呈阶梯状,最高点海拔 $1\,210 \text{ m}$,最低点海拔 16 m 。研究区东北部以山地为主,东部和西部为丘陵、台地,中部为流溪河谷地和山间小盆地,南部为冲

积平原。研究区属南亚热带季风气候,全年气候温和,雨量充沛,年平均气温20.5℃,年平均太阳辐射能443.52 kJ·cm⁻²,日照时间1 857 h,有效积温6 700℃。年均降雨量2 000 mm,蒸发量1 250 mm,多年平均径流深1.3 mm,年径流量2.7×10⁹ m³,年产水量2.3×10⁹ m³。由于地势高差明显,研究区南部平原区和北部山区的年平均气温相差1.8℃,有效积温相差1 040℃,降水量相差132 mm,蒸发量相差50 mm。根据第二次土壤普查结果,研究区陆地土壤类型主要为赤红壤、红壤和水稻土等10个土类,第四纪红土赤红壤、潮沙泥地、页红泥骨田和麻红泥田等65个土种。研究区自然植被属亚热带常绿季雨林,但由于长期开发,植被已改变为针阔叶混交林、散生马尾松灌丛草坡,丘陵草坡和山地草坡等类型。2019年研究区有街口、温泉和良口等8个镇(街道),人口63.5万,水田126 km²,占研究区总面积的15.4%。水田海拔高度在15~517 m之间,地形坡度在0°~26°之间,平均地下水位34 cm。

研究区位于北回归线两侧,南亚热带季风气候特征明显,境内山地、丘陵、盆地、河谷和平原交错分布,耕地的地理环境背景、土壤理化性质与健康状况及土地利用与管理等具有较为显著的空间差异,是研究我国南亚热带水田粮食产能关键限制因子极具典型性的研究区域。

1.2 数据来源

本研究数据来源主要包括区域地理环境数据、实地采样和水田粮食产量调查(实地测产修正)数据。区域地理环境数据中土地利用/覆被数据及行政区划界线主要根据研究区2018年土地利用现状变更调查成果分离、解析取得。DEM数据采用ASTER GDEM数据(国家基础数据中心),用于研究区海拔高度、地

形坡度等信息提取,空间分辨率30 m。根据研究区土地利用类型图与土壤类型图(第二次土壤普查成果),采用叠置法划分土地利用类型-土壤类型集合体单元3 169个。采用分层抽样法^[25],根据研究区农田主要地貌类型、土壤类型、土地利用方式及利用水平等条件设置典型耕层土壤野外采样点176个,约占单元总数的5.55%,2018年11月经实地踏勘后,删除样点典型性差、土地利用方式发生变化的样点17个(图1)。同期,通过农户访问调查水田样点近4年粮食产量最高、最低及平均年产量,并从确定的159个水田调查样点中,选择35个进行了当季水稻测产。根据经实地测产修正后的年均粮食产量构建研究区159个有效水田样点粮食产量数据样本集(表1)。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤样本采集与测定

2018年11月在水稻收割季后,采用棋盘式采样法采集距田面0~20 cm深度的水田耕层土壤样品,同

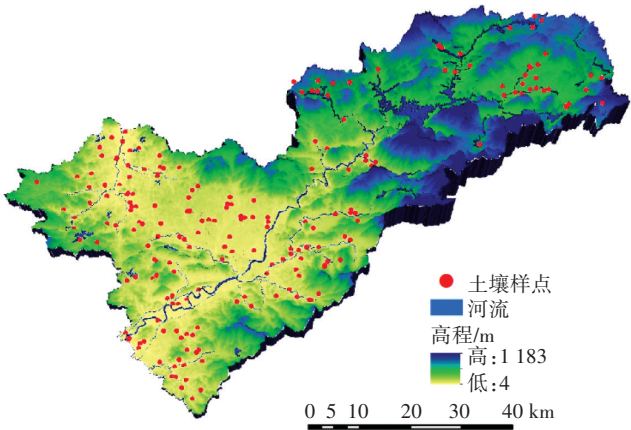


图1 研究区水田调查样点分布
Figure 1 Distribution of paddy field survey sample points in the study area

表1 研究区典型水田样点产量统计
Table 1 Yields of typical paddy fields in the study area

镇(街道) Towns	采样点数量 Number of sampling points	最高产量 The highest yield/ (kg·hm ⁻²)	最低产量 The lowest yield/ (kg·hm ⁻²)	平均产量 The average yield/ (kg·hm ⁻²)	样点密度 The density of sample points/ hm ⁻²
街口街道	2	6 300	5 400	6 000	0.014
城郊街道	17	6 900	5 800	6 105	0.011
江埔街道	14	6 300	5 700	6 000	0.013
温泉镇	10	6 000	4 500	5 400	0.011
鳌头镇	47	6 900	4 500	6 367	0.013
太平镇	28	6 300	5 250	5 812	0.012
吕田镇	25	6 000	4 500	5 400	0.010
良口镇	16	6 900	4 575	5 090	0.012

时利用洛阳铲采集距田面0~100 cm深度的土壤剖面样品,判断样本土体构型、成土母质,记录各样点的地下水位。在耕层土壤样本采样过程中,将样点经纬度、海拔高度、地形部位、地下水位、农田利用方式、基础设施状况、耕作制度与主要种植作物等信息录入调查表单。土壤样本风干后挑去根系,柠檬酸浸提处理后使用可见分光光度计(型号:UV2550)测定有效硅浓度;采用钼锑抗比色法使用可见分光光度计测定有效磷;乙酸铵浸提处理后使用电感耦合等离子体光谱仪(型号:7900)测定土壤有效钙;采用滴定法使用电子天平(型号:ML204)测定土壤有机质含量;比重计法测定土壤机械组成;凯氏法测定土壤全氮;水浸提处理后采用电位法通过pH计(型号:Seven Easy)测定土壤pH值^[26];二乙三胺五乙酸浸提处理后使用电感耦合等离子体光谱仪(型号:5100)测定土壤有效铁含量;使用电感耦合等离子体光谱仪(型号:7900)和原子荧光光谱仪(型号:AF-2200)分别测定总镉、总汞、总砷、总铅、总铬等土壤重金属含量;使用滴定管采用乙酸铵交换法测定土壤阳离子交换量;经过氯仿熏蒸处理后采用燃烧氧化-非分散红外法(仪器型号:Shimadzu TOC500)测定土壤微生物量碳,以表征土壤微生物活性。

1.3.2 地理探测器

地理探测器^[27]是研究某现象空间分布不一,即空间变异性的统计学理论方法。该模型假设自变量对因变量产生了影响,在空间上的分布就会相应产生一定的相关性;主要包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测4个探测器,其中分异及因子探测器即是探测地理属性 Y 的空间变异性和探测因子 $X_1, X_2, \dots$ 对 Y 空间变异的解释力(即贡献力),用 q 值度量。其分异及因子探测的表达式为:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中:SSW与SST分别为层内方差之和与全区总方差; L 表示因子 X 的分层,即自变量分类分级; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差; $q \in [0, 1]$, q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的贡献力越强,反之则越弱。

地理探测器现已被广泛应用于地理空间相似性与分异性研究中,如地理空间影响因素识别^[28-30]、区域分异与空间优化^[31-32]、生态环境与公共健康^[33-34]等。地理探测器擅长分析类型变量,可用于测度地

形部位、土壤类型、成土母质、农田利用方式和灌溉保障能力等类型变量对粮食产能的贡献力。它较主成分分析、多元回归等传统线性统计分析方法更为直观和快捷。

1.3.3 影响因子遴选及其量化

通过耦合“自然土壤发生-发育过程”和“人工土壤扰动过程”,结合已有的国内外研究文献,初步遴选出“地理环境健康背景”“土壤健康状况”和“农田健康人工环境”3个健康维度42个水田粮食产能影响因子。其中地理环境健康背景主要选取气候、地形、水文和土壤总体状况4个影响因素,年均降水量、 $\geq 10^\circ\text{C}$ 年均积温^[35-37]、海拔高程、地形部位^[38]、地形坡度^[39]、通常地下水位、平均水位变化^[40]和土壤类型(土种或变种)^[41]等8个影响因子。土壤健康是在土壤质量研究不断发展中衍生的概念,其状况是基于耕地固有特性与生产需求,包括持续供给初级生产力、水净化与调节、碳封存与调节、生物多样性供给、养分供给与循环等5类土壤功能,且不存在显著土壤胁迫的状态^[42],表征指标包括静态/固有、动态/受管理影响的土壤物理、化学、生物指标^[42-43]。基于已有文献,选取土壤物理健康状况、土壤肥力健康状况、微量元素健康状况、酸碱度健康状况、生物健康状况、土壤污染状况及土壤侵蚀状况7个土壤健康影响因素,成土母质、土体构型、表土质地、有机质含量、pH值、全氮、有效磷、速效钾^[44-46]、有效铁、有效硅、土壤阳离子^[47-48]、As、Cd、Cr、Hg、Pb^[49]、有机氯农药(六六六/DDT)^[50]、土壤微生物及土壤侵蚀程度^[51]等27个影响因子。农田健康人工环境选取农田利用及其变化、生产保障措施、人为管理强度3个影响因素,土地利用方式、土地利用变化、耕作扰动深度、基础设施保障水平、灌溉保证能力^[11,42,43,52]、灌溉方法和农作活动频率^[17]等7个影响因子。但由于研究区位于广州市重点生态保护区及水源保护地,根据广州市农田污染调查结果及本次调查中随机抽取的10%土壤样本重金属与有机氯农药检测结果,研究区内未发现土壤重金属及有机氯农药超标现象,因此本次水田粮食产能影响因子中暂不包括土壤污染状况影响因素及As、Cd、Cr、Hg、Pb、有机氯农药(六六六/DDT)6个影响因素。最终遴选出研究区3个健康维度的36个水田粮食产能影响因子。

采用ArcGIS软件中的克里格插值和空间分析工具完成研究区水田粮食产能影响因子的空间化,其中年均气温与年均降水量采用2015年前后3年平均的年均降水量和年均气温值进行插值测算,海拔高度、

地形坡度根据区域DEM采用ArcGIS进行测算,农田活动频率采用ArcGIS测算田块与农村居民点之间的距离进行间接表达。综合遥感分类与变更调查结果,采集样本所在农田的利用方式、利用变化等信息。将地形部位、土壤类型、成土母质、土体构型、农田利用方式、农田利用变化、耕作扰动深度、基础设施保障水平、灌溉保证能力与灌溉方法等特征类型变量直接进行分组,降水量、积温、海拔高度、有机质含量与pH值等连续型数值变量,则采用K-Means聚类进行分级离散化后分组。连续型数值变量分组数在15~40组之间,分组结果显著性 <0.01 ,组别之间具有显著差异。

2 结果与分析

2.1 基于地理探测器的因子贡献力测度

耕地粮食产能影响因子涉及到地理环境、土壤理化性质、人为活动和健康状况等多个维度,因此,我国南亚热带水田粮食产能关键影响因子识别的关键是科学、客观地测度每个因子的贡献力。根据研究区159个水田采样点数据,以水田实际粮食产能为因变量,各影响因子为自变量,采用地理探测器对各影响因子贡献力 q 值进行测度。3个健康维度的贡献力在1.200~2.702之间,平均为1.976,其贡献力大小依次为:地理环境健康背景>土壤健康状况>农田健康人工环境。13个影响因素的贡献力在0.012~0.865之间,平均为0.456,其贡献力大小依次为:水文状况>土壤物理健康状况>气候状况>地形状况>生产保障措施>微量元素健康状况>人为管理强度>土壤侵蚀状况>土壤总体状况>土壤肥力健康状况>农田利用及其变化>生物健康状况>酸碱度健康状况。36个影响因子的贡献力在0.004~0.537之间,平均为0.165(表2)。

2.2 关键限制因子识别

水田粮食产能同时受地理环境健康背景、土壤健康状况和农田健康人工环境3个健康维度的影响。但不同维度、不同因子对粮食产能影响的程度不同,因此采用分维标准差法识别关键限制因子。标准差是对一组数据距平均值分散程度的一种度量,当粮食产能影响因子贡献力大于平均值加1倍标准差时,表明其贡献力超出一般水平,具有关键影响作用;当因子贡献力小于平均值减1倍标准差时,表明其贡献力低于一般水平,影响不显著。将各个健康维度中因子贡献力平均值加1倍标准差作为关键影响因子与一般因子的界值点,3个健康维度界值点分别为0.460、

0.348和0.246。以此识别出研究区水田粮食产能的7个关键限制因子,其贡献力大小依次为:表土质地>平均水位变化>农作活动频率>土壤侵蚀程度>灌溉保障能力>有效硅含量>灌溉方法,其贡献力在0.299~0.537之间,影响显著。

水田粮食产能的地理环境健康背景中,各影响因子贡献力 q 值在0.099~0.487之间,平均值为0.338。其中平均水位变化 q 值为0.487,对水田粮食产能影响显著,是地理环境健康背景中的关键限制因子。年降水量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、海拔高程、地形部位、通常地下水位等因子的 q 值在0.308~0.422之间,属于一般影响因子。地形坡度和土壤类型的 q 值分别为0.099、0.195,对研究区水田粮食产能的影响力不显著。各影响因子贡献力大小依次为平均水位变化、年降水量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、海拔高程、通常地下水位、地形部位、土壤类型、地形坡度(图2)。

在土壤健康状况维度中,各影响因子 q 值在0.004~0.537之间,平均为0.096。土壤物理健康状况中的表土质地、微量元素健康状况中的有效硅含量以及土壤侵蚀状况中土壤侵蚀程度,其因子贡献力 q 值分别为0.537、0.363和0.413,对水田粮食产能影响显著,是土壤健康状况维度中的关键限制因子。土壤物理健康状况中的成土母质和微量元素健康状况中的有效铜含量因子贡献力 q 值分别为0.209和0.107,对水田粮食产能影响一般。其他因子贡献力 q 值低于0.100,对水田粮食产能影响不显著;尤其是土壤肥力健康状况中的有效磷和微量元素健康状况中的有效硼、有效钼和有效硫贡献力 q 值低于0.010,对水田粮食产能影响可忽略不计。各影响因子贡献力大小依次为:表土质地>土壤侵蚀程度>有效硅>成土母质>有效铜>有效锌>土体构型>土壤微生物活性>容重>有效铁>土壤阳离子浓度>有机质含量=碱解氮>速效钾=全氮>pH值=有效镁>有效硼=有效磷>有效钼=有效硫(图3)。

在农田健康人工环境维度中,各影响因子 q 值在0.005~0.436之间,平均为0.171。生产保障措施中的灌溉保障能力、灌溉方法和人为管理强度中的农作活动频率,其因子贡献力 q 值分别为0.379、0.299和0.436,对水田粮食产能影响显著,是农田健康人工环境维度中的关键限制因子。土地利用变化、耕作扰动深度和基础设施保障水平因子贡献力 q 值在0.015~0.033,对水田粮食产能影响一般。土地利用方式因子贡献力 q 值为0.005,对水田粮食产能影响可忽略

表2 健康视角下研究区水田粮食产能影响因子贡献力

Table 2 Contribution of influencing factors of grain productivity in paddy field from the perspective of land health

健康维度 Health dimension	维度贡献力 Dimensional contribution(<i>q</i>)	影响因素 Influencing elements	因素贡献力 Element contribution(<i>q</i>)	影响因子 Influencing factors	因子贡献力 Factor contribution(<i>q</i>)		
地理环境健康背景	2.702	气候状况	0.840	年降水量	0.422		
				≥10℃积温	0.418		
		地形状况	0.802	海拔高程	0.395		
				地形坡度	0.099		
				地形部位	0.308		
土壤健康状况	2.025	水文状况	0.865	通常地下水位	0.378		
				平均水位变化	0.487		
		土壤总体状况	0.195	土壤类型	0.195		
				土壤物理健康状况	0.864	成土母质	0.209
		土体构型	0.088				
		表土质地	0.537				
		容重	0.030				
		土壤肥力健康状况	0.076			有机质含量	0.014
						全氮	0.013
						碱解氮	0.014
						有效磷	0.005
						速效钾	0.013
		微量元素健康状况	0.610			土壤阳离子浓度	0.017
				有效铁含量	0.025		
				有效锌含量	0.090		
				有效硫含量	0.004		
				有效铝含量	0.004		
				有效硼含量	0.005		
				有效镁含量	0.012		
有效铜含量	0.107						
农田健康人工环境	1.200	生产保障措施	0.711	有效硅含量	0.363		
				pH值	0.012		
				土壤微生物活性	0.050		
				土壤侵蚀程度	0.413		
				土地利用方式	0.005		
				土地利用变化	0.033		
				耕作扰动深度	0.015		
				基础设施保障水平	0.033		
		人为管理强度	0.436	灌溉保障能力	0.379		
				灌溉方法	0.299		
		农作活动频率	0.436				

不计。各影响因子贡献力大小依次为:农作活动频率>灌溉保障能力>灌溉方法>基础设施保障水平>土地利用变化>耕作扰动深度>土地利用方式(图4)。

3 讨论

水田粮食产能受农田系统中大量的结构性和随机性因子影响,具有较强的空间变异性。因此,基于

相关性分析、主成分分析^[35]等传统线性认知模型,识别关键影响因子的难度较大。而融合空间分层异质性和分类算法表达的地理探测器能够更为有效地测度出多维复合影响下水田粮食产能的影响因子贡献力。在研究区内选取部分因子采用Pearson相关分析从单纯数据双变量相关性角度对地理探测器的探测结果进行验证。地理环境健康背景中选取了海拔高

程、通常地下水位和平均水位变化3个因子进行验证,3个因子与水田粮食产能的 Pearson 相关系数分别为 0.462、0.399 和 0.612,3 因子相关性都在 0.01 水平上显著,显著性(双尾)均<0.01。土壤健康状况中选

取了表土质地、有机质含量、全氮、有效铁含量和有效硅含量 5 个因子进行验证,5 个因子与水田粮食产能的 Pearson 相关系数分别为 0.482、0.117、0.023、0.077 和 0.332,5 因子中表土质地的相关性在 0.01 水平上显

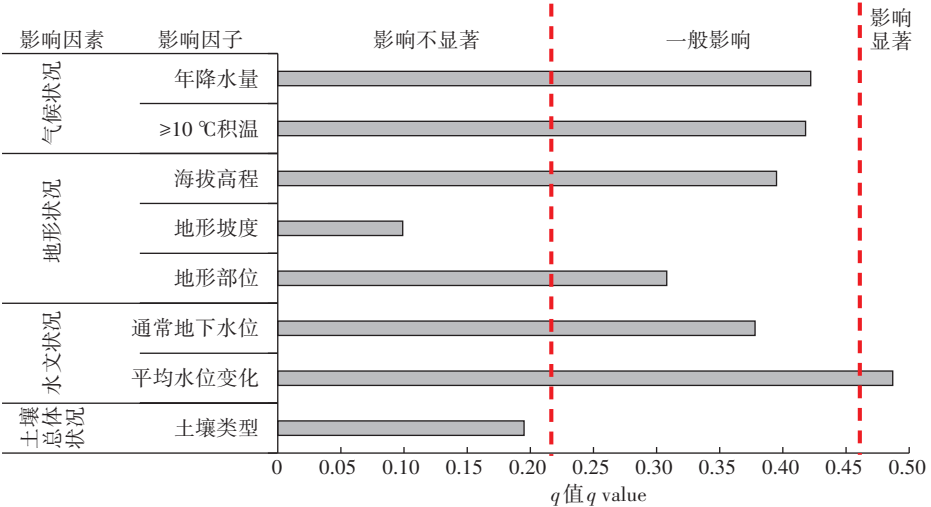


图2 地理环境健康背景维度水田粮食产能关键限制因子识别

Figure 2 Identification of key limiting factors of grain productivity in paddy field from the dimension of geographical environment health

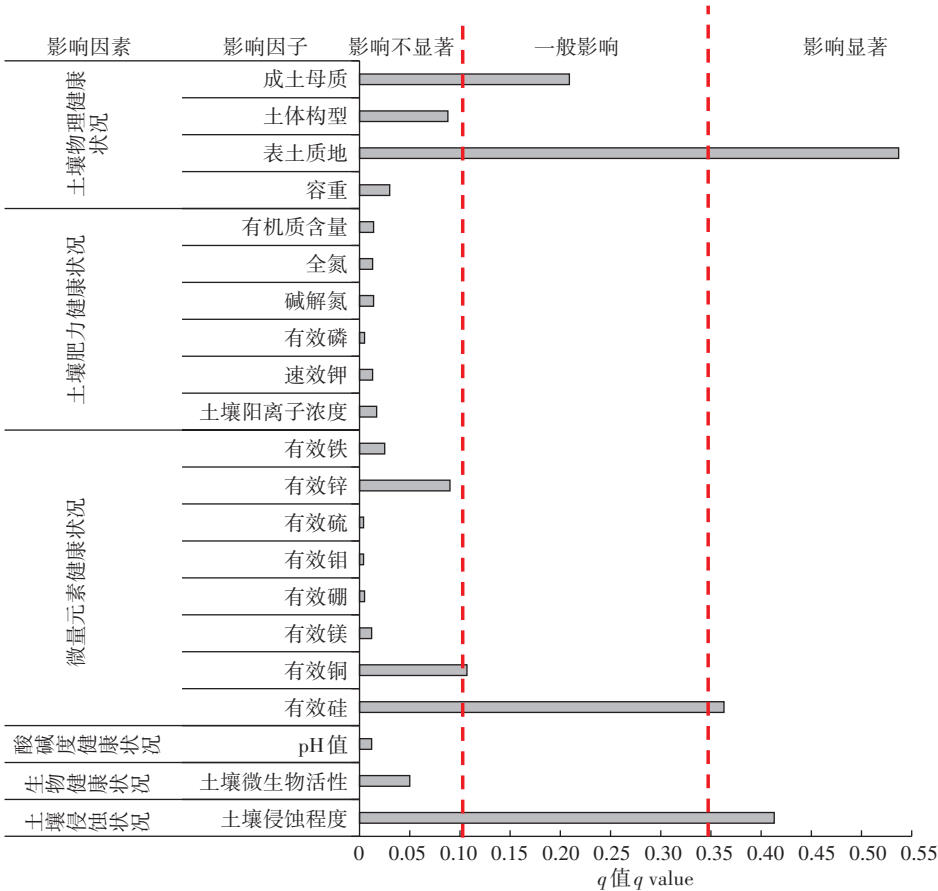


图3 土壤健康状况维度水田粮食产能关键限制因子识别

Figure 3 Identification of key limiting factors of grain productivity in paddy field from the dimension of soil health

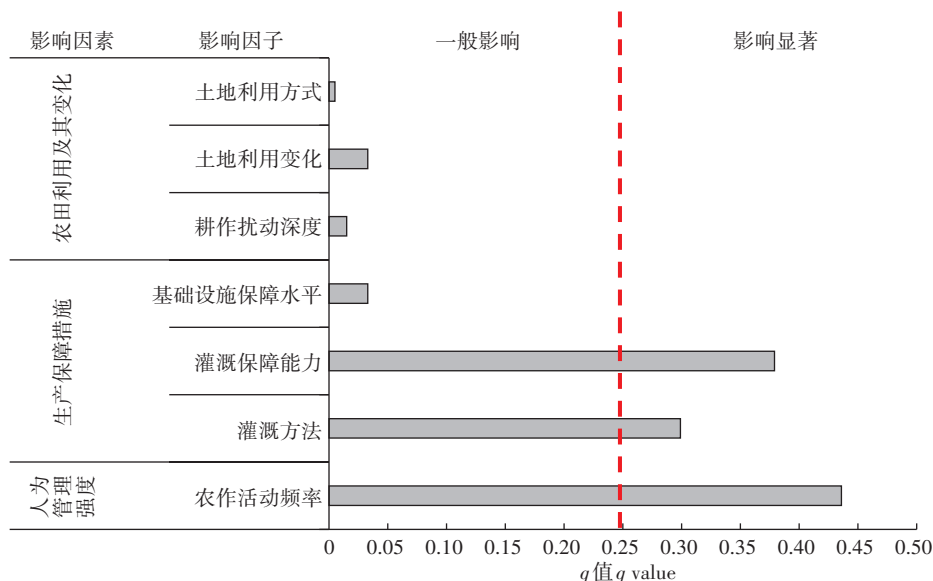


图4 农田健康人工环境维度水田粮食产能关键限制因子识别

Figure 4 Identification of key limiting factors of grain productivity in paddy field from the dimension of artificial environment health

著,有效硅含量的相关性在0.05水平上显著,而其他3个因子不显著;表土质地显著性(双尾) <0.01 ,有效硅含量显著性为0.036,其他3个因子显著性在0.098~0.776之间。农田健康人工环境也选取了耕作扰动深度、灌溉保障能力和灌溉方法3个因子进行验证,3个因子与水田粮食产能的Pearson相关系数分别为0.053、0.445和0.350,灌溉保障能力和灌溉方法2因子相关性都在0.01水平上显著,显著性(双尾)都 <0.01 ;而耕作扰动深度相关性不显著,显著性(双尾)为0.509。总体上单纯数据Pearson相关分析的结果与地理探测器的探测结果趋势基本一致,表明地理探测器适合本研究区域条件,其探测结果具有科学性、合理性。水田粮食产能影响因子众多,根据已有研究成果遴选相关因子,构建了健康视角下包含3个健康维度、13个影响因素、36个影响因子的较为完善的影响因子体系。同时,采用分层抽样法设置典型耕层土壤野外采样点,保证了所抽取的样本具有足够的代表性,较简单随机抽样方法具有更高的精度,并能够更好地控制总采样成本^[25]。

地理环境健康背景中气候、地形、水文、土壤等是影响作物生产的重要因素^[12,20,36],但是,受赤红壤区亚热带季风气候及水田耕作特征的影响,年降水量、 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、海拔高程、地形坡度、地下水位等不是制约我国亚热带水田粮食产能的关键限制因子,反而是水田水位变化对水田产能的影响更为显著,尤其是在较干旱的年份或季节,地下水位大幅变化的水田粮

食产能也显著减少^[39]。

在土壤健康状况维度中,表土质地是重要的土壤物理健康性质,已有研究表明,不同表土质地因其理化性质不同对土壤微生物、酶活性及速效养分含量产生较大影响^[53-54],表土质地是耕地产能的重要限制因子^[46],本研究中表土质地对水田粮食产能同样表现出较强的贡献力。同时,我国亚热带雨水充足,热量充沛,风化淋溶作用强烈,土壤中硅酸淋失、铁铝富集,研究区水田采样点平均有效硅含量仅为 $63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而有效硅通过调节农作物光合速率和初级代谢^[54-55]、增强作物秸秆机械强度和抗逆性^[55-57]对提高农作物产量和品质具有重要作用^[58]。与现有研究成果中有效铁、有效铜、有效锌等土壤微量元素能够显著影响农作物产量和品质^[59]的结论不同,本研究中有有效铜、有效锌等微量金属元素对我国亚热带水田粮食产能的贡献力一般,而有效硅贡献力0.363,成为我国亚热带水田产能的关键性微量元素限制因子。土壤侵蚀程度对水田粮食产能的影响也较为显著,土壤侵蚀使农田土壤颗粒分散、团聚体破坏,土壤肥力元素和有益微量元素流失^[48]。但是,在现代农业种植策略下,研究区水田耕作过程中可能大量施用了有机肥和氮磷钾无机肥^[13,16],以有机质含量、全氮、有效磷、速效钾为代表的土壤肥力健康状况、酸碱度健康状况及生物健康状况良好,导致其对我国亚热带粮食产能的影响不显著。这与已有研究成果中有机质含量和pH值是影响水田产能关键性因子^[11-12,19]

的结论具有一定差异。

农田和农作物的种植大概率来说是一个农田系统的减熵过程^[60],若长期保持有序的粮食产能状态,则必须协同科学、有效的农田管理活动。在农田健康人工环境中,相比我国北方旱地研究区水田粮食产能对农作活动频率仍存在较强的依赖性,内卷化效应不显著^[13],这与研究区内水田高强度、持续的利用活动相一致,但与利用方式及其变化相关度不高。同时,受水田耕作特殊的水环境需求制约,灌溉保障能力也是影响水田粮食产能的关键因子^[11-12,19]。另需注意的是调查样本中出现的淹灌、滴灌、喷灌等不同的灌溉方法,对研究区水田粮食产能也具有较为显著的影响。而现有研究成果则主要针对干旱、半干旱区农田^[2],对水田的影响机理研究则很少,亟需加强。

我国亚热带水田粮食产能的地理环境健康背景、土壤健康状况及农田健康人工环境3个健康维度中,关键限制因子主要集中在农田水文条件、土壤物理与微量元素健康状况及土壤侵蚀状况、生产保障措施和人为管理强度,土壤肥力、酸碱度与生物健康状况及农田利用方式与变化对我国亚热带水田粮食产能影响不显著。因此,有必要针对我国亚热带水田粮食产能的关键限制因子,进一步改良土壤质地,增强壤性;构建农田水环境精准管理技术、措施体系,提升灌溉保障能力、灌溉方法的有效性;及作物生长需求与农田水位变化的协同性;通过土地整治工程,加强梯田建设、提高田面平整度,降低土壤侵蚀程度;增施高效硅肥,改善水田微量元素健康状况;激发农户耕作积极性,增强农作活动频率。同时,建议尽快在全国范围内开展中大空间尺度农田健康状态的诊断,确定导致农田亚健康或不健康的因子标靶,定向构建健康恢复技术体系,保障农田可持续利用,逐步消除粮食产能的不稳性。

由于研究区内土壤重金属及有机氯农药污染不严重,且现有的文献中土壤污染状况对水田粮食产能的影响程度不明确,本研究暂未将土壤污染状况纳入土壤健康状况中考虑,今后将进一步深化土壤污染对中大尺度粮食产能的作用机理研究。

4 结论

(1)我国亚热带水田粮食产能主要受地理环境健康背景、土壤健康状况和农田健康人工环境3个健康维度的影响,其贡献力大小依次为:地理环境健康背景>土壤健康状况>农田健康人工环境。

(2)我国亚热带水田粮食产能影响因子众多,但从健康视角识别的7个关键限制因子主要集中在农田水文条件、土壤物理和微量元素健康状况及灌溉保障与精准管理方面,关键限制因子贡献力大小依次为:表土质地>平均水位变化>农作活动频率>土壤侵蚀程度>灌溉保障能力>土壤有效硅含量>灌溉方法。

(3)受现代农业种植策略影响,我国亚热带水田中土壤肥力、酸碱度和生物健康水平普遍较高,但仍具有较大的提升空间。土壤有效硅含量严重不足制约了我国亚热带水田粮食产能和品质的提升。同时,对于灌溉保障能力、灌溉方法等关键限制因子的农田精准水环境管理措施,也应更为重视和改善。

参考文献:

- [1] 钟继洪, 郭庆荣, 谭军. 亚热带丘陵赤红壤理化性质变化及其原因[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 312-320.
ZHONG Ji-hong, GUO Qing-rong, TAN Jun. Studies on physical and chemical properties change (degradation) and its affected factors of latored soils in southern subtropical hills[J]. *Geographical Research*, 2004, 23(3): 312-320.
- [2] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.
YUAN Jiu-qin, LIANG Yin, CAO Long-xi, et al. Comparison of benefits of runoff and sediment reduction of different hedgerow configuration modes in red-soil hilly area[J]. *Soils*, 2015, 47(2): 400-407.
- [3] 肖辉林. 华南红壤丘陵坡地的环境特征与可持续利用问题[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 594-599.
XIAO Hui-lin. Environmental features of hilly slope land of red soil in south China and the sustainable utilization[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 594-599.
- [4] 郑超, 郭治兴, 袁宇志, 等. 广东省不同区域农田土壤酸化时空变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019(2): 593-601.
ZHENG Chao, GUO Zhi-xing, YUAN Yu-zhi, et al. Spatial and temporal changes of farmland soil acidification and their influencing factors in different regions of Guangdong Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019(2): 593-601.
- [5] 李晓亮, 吴克宁, 褚献献, 等. 耕地产能评价研究进展与展望[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7): 91-100.
LI Xiao-liang, WU Ke-ning, CHU Xian-xian, et al. Research progress and prospects for cultivated land productivity evaluation[J]. *China Land Science*, 2019, 33(7): 91-100.
- [6] Liebig J. Organic chemistry in its applications to agriculture and physiology[M]. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, 1840.
- [7] Liebig J. The relations of chemistry to agriculture and the agricultural experiments of Mr J B Lawes[M]. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, 1855.
- [8] Neill L L. An evaluation of soil productivity based on root growth and water depletion[D]. Columbia: University of Missouri, 1979.

- [9] FAO. Report on the agro-ecological zones project: Methodology and results for Africa[R]. Rome: FAO, 1978.
- [10] Yamoah C F, Walters D T, Shapiro C A, et al. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 80(1):113-120.
- [11] 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 Hong-fu, ZHOU Sheng-lu, WU Shao-hua, et al. Provincial scale spatial variation of cultivated land production capacity and its impact factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8):308-314.
- [12] 宋戈, 邹朝晖, 王越. 东北粮食主产区县域耕地产能核算及其影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24):308-317.
SONG Ge, ZOU Zhao-hui, WANG Yue. Calculation of county cultivated land productivity and its analysis of influential factors of grain main production area in northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(24):308-317.
- [13] 高同彪, 刘云达. 吉林省可持续耕地产能的要素分析[J]. 东北师大学报(哲学社会科学版), 2012(6):57-60.
GAO Tong-biao, LIU Yun-da. Capacity factor analysis for sustainable arable land in Jilin Province[J]. *Journal of Northeast Normal University(Philosophy and Social Sciences)*, 2012(6):57-60.
- [14] 杨建波, 王莉, 宋富强, 等. 粮食主产区耕地质量影响因素与粮食产能关系分析[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9):15-22.
YANG Jian-bo, WANG Li, SONG Fu-qiang, et al. Major grain-producing areas of cultivated land quality influence factors and grain production capacity relationship analysis[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(9):15-22.
- [15] 赵翠萍. 河南省耕地生产效率及其影响因素分析[J]. 河南农业大学学报, 2012, 46(4):469-472, 481.
ZHAO Cui-ping. Positive analysis of productivity and influencing factors of cultivated land in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2012, 46(4):469-472, 481.
- [16] 刘浩然, 吴克宁, 宋文, 等. 黑龙江粮食产能及其影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(7):164-170.
LIU Hao-ran, WU Ke-ning, SONG Wen, et al. Study on the grain productivity and its influencing factors in Heilongjiang[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(7):164-170.
- [17] 周璟茹, 赵华甫, 宋文, 等. 村级尺度耕地产能空间分异及其影响因子分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(7):126-134.
ZHOU Jing-ru, ZHAO Hua-fu, SONG Wen, et al. Spatial variation and impact factors in cultivated land productivity at village level[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(7):126-134.
- [18] 杜海童, 崔江慧, 哈凯, 等. 滨海平原区耕地产能评价及其影响因素分析——以河北省黄骅市为例[J]. 河南农业大学学报, 2019, 42(6):16-22.
DU Hai-tong, CUI Jiang-hui, HA Kai, et al. Evaluation of cultivated land productivity and analysis of its influencing factors in coastal plain area: A case study of the Huanghua City in Hebei Province[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 42(6):16-22.
- [19] 晏蔚楠. 四川省耕地产能分异特征及主导因子研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2017.
YAN Wei-nan. Spatial variation characteristics and dominant factors of cultivated land capacity in Sichuan Province[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2017.
- [20] 姚建武, 艾绍英, 柯玉诗, 等. 赤红壤旱地钾素的生物耗竭[J]. 土壤肥料, 2002(3):7-10.
YAO Jian-wu, AI Shao-ying, KE Yu-shi, et al. The bio-exhausting experiment of potassium in the upland field of lateritic red soil[J]. *Soils and Fertilizers*, 2002(3):7-10.
- [21] 欧阳浩, 戎陆庆, 黄镇谨, 等. 基于粗糙集方法的广东省粮食产量影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(6):100-107.
OUYANG Hao, RONG Lu-qing, HUANG Zhen-jin, et al. Analysis of influencing factors of grain yields in Guangdong Province based on rough set theory[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(6):100-107.
- [22] 彭卫福, 吕伟生, 黄山, 等. 土壤肥力对红壤性水稻土水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18):3614-3624.
PENG Wei-fu, LÜ Wei-sheng, HUANG Shan, et al. Effects of soil fertility on rice yield and nitrogen use efficiency in a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18):3614-3624.
- [23] 宁建凤, 艾绍英, 李盟军, 等. 化肥减量配合有机替代对赤红壤常年菜地蔬菜生长及土壤氮平衡的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5):1008-1014.
NING Jian-feng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Impacts of reduced fertilizer application with organic N on vegetable growth and soil N balance in vegetable fields in latosolic red soil zones[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(5):1008-1014.
- [24] 郭乾坤, 梁国庆, 周卫, 等. 长期有机肥提高红壤性水稻土生物学特性及水稻产量的微生物学机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3):492-501.
GUO Qian-kun, LIANG Guo-qing, ZHOU Wei, et al. Microbiological mechanism of long-term organic fertilization on improving soil biological properties and double rice yields in red paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3):492-501.
- [25] Lin Y, Brus D J, Zhu A X, et al. Accounting for access costs in validation of soil maps: A comparison of design-based sampling strategies[J]. *Geoderma*, 2018, 315:160-169.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2013.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-127.
WANG Jin-feng, XU Cheng-dong. Principles and prospects of geographic probes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-127.
- [28] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1):107-127.

- [29] Du Z, Xu X, Zhang H, et al. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk [J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(3):e0151331.
- [30] 任向宁, 董玉祥, 王秋香. 珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库储量时空变化特征及其影响因素识别[J]. 热带地理, 2018, 38(5): 668–677.
- REN Xiang-ning, DONG Yu-xiang, WANG Qiu-xiang. Temporal and spatial variation of soil organic carbon storage in the core area of Pearl River Delta and identification of influencing factors[J]. *Tropical Geography*, 2018, 38(5): 668–677.
- [31] 杨忍, 刘彦随, 龙花楼, 等. 中国村庄空间分布特征及空间优化重组解析[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 170–179.
- YANG Ren, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou, et al. Spatial distribution characteristics and optimized reconstructing analysis of rural settlement in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 170–179.
- [32] 董玉祥, 徐茜, 杨忍, 等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 135–147.
- DONG Yu-xiang, XU Qian, YANG Ren, et al. Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using Geodetector[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 135–147.
- [33] Shen J, Zhang N, Gexi G D R, et al. Construction of a Geodetector-based model system to indicate the potential occurrence of grasshoppers in Inner Mongolia steppe habitats[J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2015, 105(3): 335–346.
- [34] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀PM_{2.5}时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 483–493.
- ZHOU Lei, WU Jian-jun, JIA Rui-jing, et al. Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. *Research of Environmental Science*, 2016, 29(4): 483–493.
- [35] Ghaemi M, Astaraei A R, Emami H, et al. Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds-east of Mashhad-Iran[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(4): 1005–1020.
- [36] 竺可桢. 论我国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系[J]. 地理学报, 1964(1): 1–13.
- ZHU Ke-zhen. Some characteristic features of Chinese climate and their effects on crop production[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1964(1): 1–13.
- [37] Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems[J]. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303–311.
- [38] 许妍, 吴克宁, 程先军, 等. 东北地区耕地产能空间分异规律及产能提升主导因子分析[J]. 资源科学, 2011, 33(11): 2030–2040.
- XU Yan, WU Ke-ning, CHENG Xian-jun, et al. Spatial variation in cultivated land production capacity and analysis of main impact factors for promoting production capacity in northeast China[J]. *Resources Science*, 2011, 33(11): 2030–2040.
- [39] 王电龙, 张光辉. 不同气候条件下华北粮食主产区地下水保障能力时空特征与机制[J]. 地球学报, 2017, 38(增刊1): 47–50.
- WANG Dian-long, ZHANG Guang-hui. Groundwater ensure capacity spatial-temporal characteristics and mechanism in main grain producing areas of North China Plain under different climatic conditions [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(Suppl 1): 47–50.
- [40] Morgan C L S. Assessing soil health: Soil water cycling[J]. *Crops & Soils*, 2020, 53(5): 35–41.
- [41] 朱英杰, 刘富启, 张燕, 等. 不同土壤条件下氮肥处理对小麦产量及品质的影响[J]. 作物杂志, 2020(3): 184–190.
- ZHU Ying-jie, LIU Fu-qi, ZHANG Yan, et al. Effect of nitrogen treatment on wheat yield and quality in different soil conditions[J]. *Crops*, 2020(3): 184–190.
- [42] 吴克宁, 杨洪钧, 赵瑞. 我国耕地土壤健康评价探讨[J/OL]. 中国农业资源与区划: 1–8. (2020–09–22). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.s.20200922.1533.002.html>.
- WU Ke-ning, YANG Qi-jun, ZHAO Rui. Discussion on soil health assessment of arable land in China[J/OL]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*: 1–8. (2020–09–22). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.s.20200922.1533.002.html>.
- [43] Dent D. A standard for soil health[J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2020, 77(4): 613–618.
- [44] Feller C L, Ljm T, Manlay R J, et al. “The principles of rational agriculture” by Albrecht Daniel Thaer (1752–1828). An approach to the sustainability of cropping systems at the beginning of the 19th Century [J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2003, 166(6): 687–698.
- [45] Ayalew A. Construction of soil conservation structures for improvement of crops and soil productivity in the southern Ethiopia[J]. *Journal of Environment & Earth Science*, 2011, 9(1): 2–4.
- [46] 戴文举, 王东杰, 卢瑛, 等. 华南地区县域耕地质量和产能评价研究——以广东吴川为例[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 419–430.
- DAI Wen-ju, WANG Dong-jie, LU Ying, et al. Evaluation of county level cultivated land quality and productivity in south China: A case study of Wuchuan City, Guangdong Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 419–430.
- [47] 张小丹, 吴克宁, 赵瑞, 等. 县域耕地健康产能评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 294–300.
- ZHANG Xiao-dan, WU Ke-ning, ZHAO Rui, et al. Evaluation of healthy productivity of cultivated land at county scale[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(3): 294–300.
- [48] 杨恬, 朱照宇. 珠江三角洲丘陵赤红壤开发中的问题与可持续利用[J]. 热带地理, 2007, 27(5): 395–399, 404.
- YANG Tian, ZHU Zhao-yu. Sustainable utilization of hilly latosolic red soil in the Pearl River Delta[J]. *Tropical Geography*, 2007, 27(5): 395–399, 404.
- [49] 张东, 张楚凡. 北河流域土壤重金属污染风险评价及影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2187–2193.
- ZHANG Dong, ZHANG Chu-er. Risk assessment and impact factor analysis of soil heavy metal pollution in Beihe River basin[J]. *South-west China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(5): 2187–2193.
- [50] 韩宝禄, 薛南冬, 李发生, 等. 污染土壤中六六六和DDT在温室中的分布特征及动态变化研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1739–1744.
- HAN Bao-lu, XUE Nan-dong, LI Fa-sheng, et al. Spatial distribution

- and dynamic change of the organochlorine pesticides DDTs and HCHs in contaminated soils under greenhouse conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1739-1744.
- [51] 温良友, 张青璞, 孔祥斌, 等. 基于产能与健康综合评价的北京大兴区耕地整治分区[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22):79-89.
- WEN Liang-you, ZHANG Qing-pu, KONG Xiang-bin, et al. Arable land consolidation zoning based on comprehensive evaluation of capacity and health[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22):79-89.
- [52] 陈劲丰, 岳遥. 田间管理措施及土壤侵蚀对农田温室气体通量的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(3):491-499.
- CHEN Jin-feng, YUE Yao. Impacts of field management measures and soil erosion on greenhouse gases fluxes of the farmland[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(3):491-499.
- [53] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响[J]. 地理科学进展, 2004(2):77-87.
- FANG Hua-jun, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, et al. Effect of soil erosion on soil organic carbon in cropland landscape[J]. *Progress in Geography*, 2004(2):77-87.
- [54] 刘松涛, 田春丽, 曹雯梅. 不同土壤质地棉花根际微生物及酶活性与土壤理化性质相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(5):165-167, 181.
- LIU Song-tao, TIAN Chun-li, CAO Wen-mei. Study on the correlation between rhizosphere microorganism and enzyme activity of cotton with different soil texture and soil physicochemistry[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(5):165-167, 181.
- [55] 郎漫, 李平, 魏玮. 不同土壤质地黑土净氮转化速率和温室气体排放规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2):429-436.
- LANG Man, LI Ping, WEI Wei. Regularity of net nitrogen transformation rates and greenhouse gas emissions in black soil of different textures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2):429-436.
- [56] Alvarez J, Datnoff L E. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production[J]. *Crop Protection*, 2001, 20(1):43-48.
- [57] Meena V D, Dotaniya M L, Coumar V, et al. A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2014, 84(3):505-518.
- [58] Anderson D L, Jones D B, Snyder G H. Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on everglades histosols[J]. *Agronomy Journal*, 1987, 79(3):531-535.
- [59] Barker A V, Pilbeam D J. Handbook of plant nutrition[M]. New York: CRC Press, 2007:551-568.
- [60] 崔媛. 基于大数据分析的农业气候与农作物产量变化研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(2):112-117.
- CUI Yuan. The change of agricultural meteorology and crop production based on big data analysis[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(2):112-117.