中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于GIS和土地质量地球化学数据的水稻种植适宜性评价——以安徽省青阳县为例

韩慧杰，夏学齐，吴海东，汤明，姜明亮

引用本文:
韩慧杰, 夏学齐, 吴海东, 等. 基于GIS和土地质量地球化学数据的水稻种植适宜性评价——以安徽省青阳县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 591−600.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180699

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于土地适宜性和固碳需求的紫云英种植布局研究:以福建省浦城县为例

Optimal arrangement of milk vetch plantation based on land suitability and carbon sequestration in croplands: A case study of Pucheng County, Fujian Province

中国生态农业学报. 2018, 26(1): 125−135 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170751

三江平原大豆种植的土地适宜性评价

Evaluation of agricultural land suitability for soybean cultivation in the Sanjiang Plain, Northeast China

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 419−428 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160342

基于生态位理论的东北黑土区耕地整治适宜性评价——以公主岭市为例

Evaluation of cultivated land consolidation suitability in Northeast China black soil zone using niche−fitness model: A case study of Gongzhuling City

中国生态农业学报. 2018, 26(3): 432−441 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170633

高标准基本农田建设时序安排研究--以河北省涿州市为例

Time sequence of high−standard prime farmland construction−A case study of Zhuozhou City, Hebei Province

中国生态农业学报. 2016, 24(9): 1265−1274 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160007

云南省小粒咖啡种植生态适宜性区划

Ecological suitability zoning of Coffea arabica L. in Yunnan Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 168−178 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190509

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 4 月 第 27 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2019, 27(4): 591−600

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180699

韩慧杰, 夏学齐, 吴海东, 汤明, 姜明亮. 基于 GIS 和土地质量地球化学数据的水稻种植适宜性评价——以安徽省青阳县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 591−600

HAN H J, XIA X Q, WU H D, TANG M, JIANG M L. Evaluation of rice planting suitability using GIS and geochemical land quality data — A case study of Qingyang County, Anhui Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(4): 591−600

基于 GIS 和土地质量地球化学数据的水稻种植适宜性评价*

——以安徽省青阳县为例

韩慧杰[1], 夏学齐[1**], 吴海东[2], 汤　明[2], 姜明亮[2]

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院　北京　100083; 2. 安徽金联地矿科技有限公司　合肥　230000)

摘　要: 为加快安徽省青阳县的高标准基本农田建设, 开展更加精准的水稻种植适宜性评价, 本文根据研究区土地质量地球化学数据和当地水稻对生长环境的需求, 通过层次分析法(AHP)把水稻种植适宜性评价作为目标层, 把影响目标层的立地条件、理化性质、土壤质量、土地管理作为准则层, 再把影响准则层中各因素的项目作为指标层, 确定研究区水稻种植适宜性评价的层次模型, 构建了包括土壤养分、土壤环境、土壤质地、有机质、排水和灌溉能力等在内共计 12 项指标的评价体系。以研究区二调图斑为评价单元, 根据数字高程模型(DEM)数据获取精准的田面坡度数据, 同时结合 GIS 空间分析技术对地球化学数据进行空间插值模拟。利用特尔菲法(Delphi)获取各指标隶属度并构建判断矩阵, 使用 MATLAB 数学软件求出各指标的权重, 计算获取水稻种植适宜性综合指数(RSI), 进行适宜性评价。结果显示: “高度适宜”面积为 36.89 km^2, 占基本农田总面积的 19.80%, 主要分布在研究区中部及南部地区; “适宜”和“勉强适宜”面积分别为 61.95 km^{2}和 60.89 km^2, 分别占 33.25%和 32.68%, 分散分布; “不适宜”面积约 26.60 km^2, 占比 14.27%, 主要位于研究区中部及北部地区。利用实测水稻籽实 Cd 含量与该评价方法得到的水稻种植适宜性综合指数(RSI)进行分析, 发现两者呈显著负相关, 随着 RSI 的增长, 水稻籽实中 Cd 含量逐渐降低, 意味着水稻品质的提高, 同时也减少了可能通过食物链对生态环境造成的危害。该结果从生态安全方面证明此评价方法的正确性和适用性。本文探讨了土地质量地球化学数据所反映的水稻生产问题, 改善了以往农业种植适宜性评价工作中大量使用描述性指标和指标分级模糊不清所导致的主观性较大和评价方法不易推广等问题, 不仅为作物种植适宜性评价提供了新的方法, 而且为生态农业发展指明了方向。

关键词: 水稻; 种植适宜性; 土地质量; 土壤重金属; GIS; 青阳县

中图分类号: S511　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 2096-6237(2019)04-0591-10

Evaluation of rice planting suitability using GIS and geochemical land quality data — A case study of Qingyang County, Anhui Province*

HAN Huijie[1], XIA Xueqi[1**], WU Haidong[2], TANG Ming[2], JIANG Mingliang[2]

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Anhui Jinlian Geology and Mineral Resources Technology Co., Ltd., Hefei 230000, China)

* 国家重点研发计划(2017YFD0800300)和安徽省国土资源厅公益性土地质量地球化学调查项目(2015-g-20)资助

** 通信作者: 夏学齐, 主要从事环境地球化学的教学和研究工作。E-mail: xiaxueqi@cugb.edu.cn

韩慧杰, 主要从事环境地球化学研究工作。E-mail: hanhj666@163.com

收稿日期: 2018-07-26　接受日期: 2018-12-28

* This work was supported by the National Key R & D Program of China (2017YFD0800300) and the Land Quality Geochemical Survey Project in Public Welfare of Anhui Provincial Department of Land and Resources (2015-g-20).

** Corresponding author, E-mail: xiaxueqi@cugb.edu.cn

Received Jul. 26, 2018; accepted Dec. 28, 2018

Abstract: In order to accelerate the construction of high-standard basic farmlands in Qingyang County, Anhui Province and to conduct more accurate evaluation of rice planting suitability, an Analytic Hierarchy Process (AHP) was used to evaluate the suitability of rice planting with site conditions, soil physicochemical properties, soil quality and land management as the criterion layer. We then used the driving factors as the index layer to successively devise a three-level hierarchical model for the evaluation. Thus, the evaluation system comprising 12 indicators (including soil nutrient, soil environment, soil texture, soil organic matter, drainage capability, irrigation capacity, and etc.) were constructed based on geochemical land quality data of the prime farmland in the study area and on the demand for local rice production. With the polygons of the Second Land Survey as evaluation units, the field slope was obtained from digital elevation model (DEM) data, and combined with spatial analysis technology in GIS to simulate spatial interpolation of geochemical data. The Delphi method was used to determine index membership and build judgment matrix to calculate the weight of each index in order to obtain the comprehensive rice planting suitability index (RSI). The results showed that the "highly suitable" land area was 36.89 km^2, accounting for 19.80% of the total area, which was mainly distributed in the central and southern regions of the study area. The areas of "suitable" and "barely suitable" lands were respectively 61.95 km^2 (33.25%) and 60.89 km^2 (32.68%) and were sporadically distributed. The area of "unsuitable" land was 26.60 km^2 (14.27%) and was also mainly distributed in the central and northern regions of the study area. The measured cadmium content of rice seeds and RSI were significantly negatively correlated. The cadmium content of rice grains gradually decreased with the increasing of RSI. The low heavy metal content implied improvement of rice quality and reduction in potential damage to the ecological environment through food chain. The results proved the correctness and applicability of the evaluation method from the perspective of ecological security. We explored rice production issues reflected by geochemical data of land quality. The established evaluation method of agricultural planting suitability improved the past evaluation methods, which was subjective and non-suitable for application due to many descriptive indicators and uncertain indicator grading.

Keywords: Rice; Planting suitability; Land quality; Soil heavy metal; GIS; Qingyang County

土地是农业、林业和畜牧业最基本的生产资料, 也是人类生产和生活的基本场所[1]。耕地是支撑人类社会经济发展的一种重要土地资源, 也是农业生产的重要物质基础[2]。发达国家的耕地资源管理已进入生态环境管护阶段, 而我国的耕地资源管理总体上还处在管理粗放的初级阶段, 不能适应农业现代化的要求[3-4]。因此合理利用耕地资源, 做好耕地数量和质量管控, 仍是我国目前面临的重要问题。土地农业适宜性评价是在农业生产中根据某种利用方式的特定要求评定土地对于该用途是否适宜以及适宜程度的一项工作[5-6], 它是制定土地利用决策和科学编制土地利用规划的基本依据[7]。

水稻(*Oryza sativa*)种植生态适宜性评价是对水稻在某区域内的气候、地形、土壤等环境条件适宜性程度进行的综合性评价[8], 地理信息系统(geographic information system, GIS)可以把大区域范围内的点位属性数据同地理空间数据相结合, 现已成为农业适宜性评价的重要技术手段[9-10]。如 Chen 等[11]利用 GIS 进行了河南省烟草(*Nicotiana tabacum*)生态适宜性综合评价研究, 史同广等[12]利用 GIS 对山东省日照市茶园土地适宜性进行评价研究, 吴志刚等[13]基于 GIS 对药材温郁金(*Curcuma wenyujin*)进行种植适宜性评价, 李文西等[14]对水稻种植适宜性评价及指标选取进行研究。科学高效地开展农业适宜性评价, 合理利用耕地资源, 对区域经济和农业可持续发展起着至关重要的作用。

水稻是全球近一半人口的主要粮食作物[15], 我国是世界大米主要出口国之一, 水稻在我国粮食生产中占有重要地位[16]。影响水稻生产的主要因素有地学条件、土壤养分、土壤环境、灌溉与排涝能力等多种因素, 其次是水稻品种、施肥管理和病虫害等这些人为影响因素[16-17]。合理开展水稻种植适宜性评价有利于掌握水稻生产和耕地质量状况、改善农业种植结构、保障农民增产增收。目前, 水稻种植适宜性评价仍然以部分地学条件和土壤养分条件辅以气候因素或经济效益为主要评价指标[18-22], 鲜有涉及土壤环境污染指标对水稻种植适宜性的研究, 而我国土地与农产品中重金属污染问题与国外相比已相当严重[23-24]。安徽省是中国水稻种植和消费大省, 各种土壤污染问题也比较突出[25-26]。因此, 本文在安徽省青阳县内着重开展了包括土壤养分、土壤理化性质和土壤环境污染等多项指标在内的水稻种植适宜性评价, 并进行评价方法验证, 探讨土地质量地球化学数据反映的水稻种植适宜性问题, 这不仅为作物种植适宜性评价提供了新的方法, 而且为改善研究区农业种植结构、实现生态农业发展、优化土地资源利用等提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青阳县隶属于安徽省池州市, 地处皖南山区东

北部, 地势南高北低, 南部高山峭拔, 中部为丘陵, 北部多平原、圩区。该县属亚热带季风湿润气候区, 雨量充沛[27]。研究区内土壤发育多种地貌类型, 土壤形成具有强烈的地质风化、淋浴作用和旺盛的生物循环等特点, 受气候生物带影响, 山地土壤又呈垂直分布, 同时还受不同的中小地形、水文地质条件、成土母质及人为的影响[28], 形成区域性或土壤类型组合形分布。该县域内土壤成土母质主要以花岗岩、微晶灰岩、生物碎屑灰岩、粉砂质泥岩互层为主, 岩性跨度较大, 土壤分为 4 个土纲, 6 个土亚纲, 9 个土类。在 9 个土类中以红壤和水稻土分布面积最广(表 1、图 1)。本次研究区为青阳县基本农田保护区, 面积约 186.3 km², 水田占常用耕地面积的九成左右, 以种植水稻为主[16,29]。

表 1　研究区青阳县土壤类型统计表

Table 1　Soil type statistics of the study area of Qingyang County

土纲 Soil class	亚纲 Subclass	土类 Soil group	亚类 Subgroup	所占面积 Area (km²)	所占比例 Ratio (%)
人为土 Anthropogenic soil	人为水成土 Anthropogenic aquatic soil	水稻土 Paddy soil	潴育水稻土 Submergenic paddy soil	206.83	17.52
			潜育水稻土 Gleyed paddy soil	16.11	1.36
铁铝土 Ferralsol	湿热铁铝土 Muggy ferralsol	红壤 Red soil		513.13	43.47
	湿暖铁铝土 Humid ferralsol	黄壤 Yellow soil		2.10	0.18
淋溶土 Alfisol	温暖淋溶土 Warm alfisol	黄棕壤 Yellow-brown soil		18.38	1.56
	温湿淋溶土 Humid alfisol	暗棕壤 Dark brown soil		28.27	2.39
初育土 Primitive soil	石质初育土 Lithic primitive soil	石灰岩土 Limestone soil		125.88	10.66
		紫色土 Purple soil		84.29	7.14
		石质土 Lithosol		6.37	0.54
		粗骨土 Skeletal soil		179.18	15.18
合计 Total				1 180.54	100.00

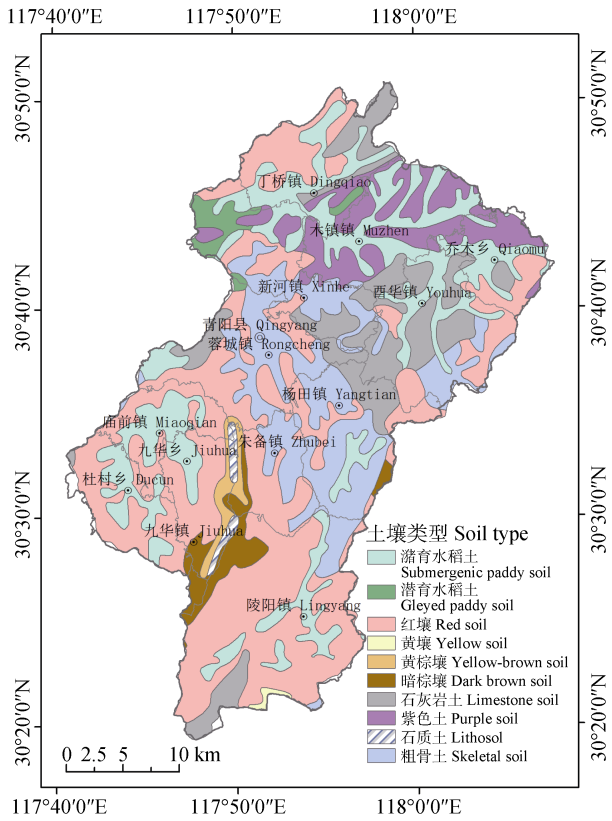

图 1　研究区青阳县土壤类型分布图

Fig. 1　Distribution map of soil types of the study area of Qingyang County

1.2　评价流程

1.2.1　评价指标及数据获取

研究区内共采集土壤表层样品 1 186 件, 重复样点 35 个; 水稻稻穗样品 50 个。将采集的土壤样品和水稻稻穗置于干净、无污染的场地自然风干。稻穗晾干后人工脱粒、去壳成糙米, 筛除杂物后混合均匀。将每件土壤和水稻籽实样品各称取 200 g 置于干净的自封袋中并编号, 样品处理完成后送至国土资源部合肥矿产资源监督检测中心进行进一步处理和土地质量地球化学指标的化验测试, 以确保所用数据的质量。后期将测试数据与研究区二调土地利用图斑整合, 形成研究区的土地质量地球化学调查评价数据库。

本次评价以该数据库为基础, 获取土壤养分、土壤环境以及土壤理化性质等多项指标数据。所有数据均有精确的空间坐标信息。采用的评价指标主要依据研究区的土地质量地球化学调查数据库中的数据和当地水稻对生长环境的需求, 并考虑指标的量化和分级等因素。选取指标有: 田块大小、田块规整度、田面坡度、土壤质地、有机质、pH、碱解氮、速效磷、速效钾、土壤环境、排涝能力、灌溉能力等 12 项指标。

指标数据的获取来源于研究区的土地质量地球化学调查数据库，部分指标数据的等级划分依据《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》进行。其中，田块大小和田块规整度两项指标通过 ArcGIS 软件获取评价图斑面积和周长，并根据景观生态学斑块指数公式计算获取田块规整度；田面坡度指标利用 ArcGIS 软件提取研究区范围内采样期间的遥感数字高程模型(DEM)数据，进行海拔和坡度坡向计算；土壤质地、有机质、pH、碱解氮、速效磷、速效钾等指标直接采用研究区的土地质量地球化学调查评价数据库；土壤环境指标在本文中特指土壤重金属污染状况，而非气候、温度等因素，该数据利用研究区的土地质量地球化学调查评价数据库，对每个评价单元中的砷、镉、汞、铅、铬、镍、铜、锌等 8 种土壤重金属污染等级最高的数据进行提取赋值(即重金属污染等级的一票否决制，按最高污染等级赋值)；排涝能力和灌溉能力两项指标使用该数据库和野外实地调查综合赋值。

使用的景观生态学斑块指数公式如下：

$$R=2\log(L/4)/\log A \quad (1)$$

式中：R为田块规整度，L为田块周长，A为田块面积。

1.2.2 建立评价指标层次模型和判断矩阵

层次分析法(AHP)是将与决策相关的元素分解成目标层、准则层、指标层等多个层次，进行定性和定量分析的决策方法[30]。本次研究把水稻种植适宜性评价作为目标层(A)，把影响目标层的立地条件、理化性质、土壤质量、土地管理作为准则层(B)，再把影响准则层中各因素的项目作为指标层(C)，依次划分出这 3 个层次，构建研究区水稻种植适宜性评价层次模型(表 2)。

表 2 水稻种植适宜性评价层次模型

Table 2 Hierarchical model of rice planting suitability evaluation

目标层(A) Destination layer (A)	准则层(B) Criterion layer (B)	指标层(C) Index layer (C)
水稻种植适宜性评价 Rice planting suitability evaluation	立地条件 Site conditions	田块大小 Field size
		田块规整度 Field regularity
		田面坡度 Field slope
	土壤理化性质 Physicochemical properties of soil	质地 Texture
		有机质 Organic matter
		pH
	土壤质量 Soil qualities	碱解氮 Available nitrogen
		速效磷 Available phosphorus
		速效钾 Available potassium
		土壤环境 Soil environment (As, Cd, Hg, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn)
	土地管理 Land management	排涝能力 Drainage capability
		灌溉能力 Irrigation capacity

利用特尔菲法(Delphi)辅以文献研究法，统计该研究领域的专家学者和有经验的农林技术人员对各层次参评因子的重要性量化打分，再结合研究区已获得的相关研究成果和数据进行优化调整。将各打分数值归一化后，计算某层次内的指标关系，并构建出各层次的判断矩阵，如表 3 所示。采用 MATLAB 数学软件对各矩阵进行一致性检验并计算指标权重[16,31-34]。

表 3 水稻种植适宜性评价模型中目标层**(A)**判断矩阵

Table 3 Objective layer (A) judgment matrix in the evaluation model of rice planting suitability

	立地条件 Site conditions	土壤理化性质 Soil physicochemical property	土壤质量 Soil quality	土地管理 Land management
立地条件 Site conditions	1.000 0	1.200 0	1.800 0	1.000 0
理化性质 Soil physicochemical property	0.833 3	1.000 0	1.500 0	0.833 3
土壤质量 Soil quality	0.555 6	0.666 7	1.000 0	0.555 6
土地管理 Land management	1.000 0	1.200 0	1.800 0	1.000 0

目标层(A)特征向量归一化：[0.20，0.24，0.36，0.20]；一致性检验通过。

1.2.3 计算组合权重

一致性检验通过后，各判断矩阵的特征向量即

为该项指标相对于上一层的权重。各指标在准则层中的权重乘以准则层相对于目标层的权重, 计算得到组合权重值, 见表 4。

1.2.4　确定指标隶属度

根据专家意见和《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》[35], 结合相关适宜性评价成果的隶属度划分指导, 将评价指标进行隶属度计算。对于土壤质地、pH、排涝能力和灌溉能力等定性指标可以根据研究区实地情况结合当地的专家意见给出隶属度。例如灌溉能力指标被确定为“可以充分满足”和“无灌溉能力”时, 其隶属度分别为 1 和 0, 介于此间的指标等级划分可以根据指标的分级特征合理的匹配隶属度。部分指标隶属度表述见表 5。

表 4　水稻种植适宜性评价指标体系的组合权重计算表

Table 4　Combination weight calculation table of the evaluation index system of rice planting suitability

	立地条件 Site conditions	土壤理化性质 Soil physicochemical property	土壤质量 Soil quality	土地管理 Land management	组合权重 Combination weight
	0.20	0.24	0.36	0.20	
田块大小 Field size	0.16				0.048 0
田块规整度 Field regularity	0.20				0.056 0
田面坡度 Field slope	0.36				0.096 0
质地 Texture		0.38			0.072 0
有机质 Organic matter		0.28			0.086 4
pH		0.34			0.081 6
碱解氮 Available nitrogen			0.16		0.057 6
速效磷 Available phosphorus			0.24		0.086 4
速效钾 Available potassium			0.28		0.100 8
土壤环境 Soil environment			0.32		0.115 2
排涝能力 Drainage capability				0.40	0.080 0
灌溉能力 Irrigation capacity				0.60	0.120 0

表 5　水稻种植适宜性评价指标中部分指标隶属度划分

Table 5　Membership division of partial indexes of rice planting suitability evaluation

指标 Index	隶属度分值与等级划分 Membership score and grade division				
	1	0.9	0.7	0.5	0.2
田块大小 Field size (m^2)	≥300	100~300	50~100	<50	
田块规整度 Field regularity	<0.5	0.5~1	1~2	2~5	≥5
田面坡度 Field slope (°)	<2	2~5	5~10	10~15	≥15
	1	0.9	0.8	0.6	0.4
有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	>40	30~40	20~30	10~20	≤10
碱解氮 Available nitrogen ($mg \cdot kg^{-1}$)	>150	120~150	90~120	60~90	≤60
速效磷 Available phosphorus ($mg \cdot kg^{-1}$)	>40	20~40	10~20	5~10	≤5
速效钾 Available potassium ($mg \cdot kg^{-1}$)	>200	150~200	100~150	50~100	≤50
	1	0.8	0.5	0.3	0.1
土壤环境 Soil environment	一等 Class 1	二等 Class 2	三等 Class 3	四等 Class 4	五等 Class 5

需要指出的是: 土壤环境指标是根据《土地质量地球化学评价规范》, 参照《GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中农用地土壤污染风险筛选值(基本项目)[36], 计算每个评价单元中的砷、镉、汞、铅、铬、镍、铜、锌等 8 种土壤重金属 i 的单项污染指数(P_i), 获取各项指标的污染等级; 在单个重金属污染指标的最高等级中找出最大值作为该评价单元的土壤环境指数, 即参照上述规范要求, 在单指标土壤环境地球化学等级划分基础上, 每个评价单元的土壤环境地球化学综合等级等同于单指标划分出的环境等级中最差的等级。1 等至 5 等对应的 P_i 和含义分别为: $P_i \leq 1$(清洁)、$1 < P_i \leq 2$(轻微污染)、$2 < P_i \leq 3$(轻度污染)、$3 < P_i \leq 5$(中度污染)和 $P_i > 5$(重度污染)。

土壤重金属 i 的单项污染指数 P_i 的计算公式为:

$$P_i=C_i/S_i \quad (2)$$

式中: C_i 为土壤中污染物 i 的实测质量分数, 单位为 $mg\cdot kg^{-1}$; S_i 为土壤中污染物 i 在 GB 15618—2018 中给出的农用地土壤污染风险筛选值, 单位为 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2.5 评价方法

本文中适宜性评价工作采用综合指数评价法, 各评价因子的隶属度与相应的准则层权重相乘, 得出各评价因子的得分, 再计算每一评价单元(即各个土地二调图斑)内所有参评因子的总分, 采用累加法计算每个评价单元的水稻种植适宜性综合指数(RSI), 公式如下:

$$RSI=\sum(F_i\times W_i) \quad (i=1, 2, 3, \cdots, n) \quad (3)$$

式中: RSI 为水稻种植适宜性综合指数, F_i 为第 i 个评价因子的隶属度, W_i 为第 i 个评价因子的组合权重。

根据计算出的适宜性指数分布规律, 参照自然间断点分级法, 进行适当调整, 将研究区范围内的水稻种植适宜性分为 4 类: RSI≥0.836(高度适宜)、0.805≤RSI<0.836(适宜)、0.770≤RSI<0.805(勉强适宜)、RSI<0.77 0(不适宜)。

2 结果与分析

2.1 研究区水稻种植适宜性评价结果

研究区水稻种植适宜性评价结果见表 6, 空间分布见图 2。研究区内“高度适宜”水稻种植面积为 36.89 km^2, 占基本农田总面积的 19.80%, 大致分布在研究区中部的杜村乡、庙前镇、朱备镇部分地区、南部的陵阳镇及北部的丁桥镇和木镇镇的少数地区; “适宜”和“勉强适宜”面积分别为 61.95 km^2 和 60.89 km^2, 分别占 33.25%和 32.68%, 在研究区内较为分散; “不适宜”面积约 26.60 km^2, 占比 14.27%, 主要位于研究区中部的蓉城镇和杨田镇以及北部的丁桥镇和木镇镇等部分地区。

根据水稻种植适宜性评价空间分布图可以看出, 研究区大致分为南部适宜区、中部不适宜区和北部变化适宜区 3 大部分。深入挖掘各指标对评价结果的影响程度, 可以了解研究区内不同区域影响水稻种植适宜性的障碍因素, 进而对水稻生产做一些区划调整:

1)南部农田耕地条件较好, 易于耕作, 但存在养分不足, 田块状况不好等影响因素。当地应针对这些问题加强土地整治、增建配套灌溉设施、整合零散地块、优化田块状况以便于土地集中管理, 提高机械化耕作水平和加强农艺配套技术应用提高水稻生产能力, 确保这些地区作为粮食生产的主要基地不受破坏。

2)中部地区地形较好, 但土壤养分不足、土壤 pH 不适宜以及部分污染等因素表现突出, 致使部分地区水稻种植适宜性较差。因此当地应针对这些问题加强土壤改良、调节土壤的 pH, 同时合理配比施肥, 重视施用有机肥, 提高土壤有效磷和速效钾等养分元素的含量, 推广种植适应性较好的水稻品种, 保证水稻生产, 提高水稻品质, 确保粮食增产增收。

3)北部地区地形复杂, 农田耕作条件参差不齐, 部分地区存在严重的土壤污染和养分缺乏问题, 这些农田相对分散, 不便于统一管理, 可依据实地情况, 改良耕作条件、控制土壤污染、提高土壤养分, 推广种植适应性较好的水稻改良品种或高抗品种; 对于部分严重的“不适宜”地区可以改种油菜(*Brassica napus*)、药材、茶(*Camellia sinensis*)等当地适宜的作物, 形成种植规模, 建立销售渠道, 保证当地农民增收。

2.2 基于水稻籽实重金属含量的评价方法验证

本研究采用的水稻种植适宜性评价方法中因其指标选取和权重赋值存在一定的可变性, 可以认为是一种具有部分主观因素的评价方法。水稻品质的优劣是对水稻种植适宜性综合指数的一种客观反映, 水稻籽实中的重金属含量又是人们最为关注的生态健康问题, 因此可用水稻籽实中的重金属含量作为本评价方法的客观检验。

表 6 研究区水稻种植适宜性评价分级结果

Table 6 Grading scheme of suitability evaluation of rice planting in the study area

适宜性 Suitability	水稻种植适宜性综合指数 Comprehensive index of rice planting suitability (RSI)	评价单元 Evaluation unit		农田 Farmland	
		单元数 Number	比例 Ratio (%)	面积 Area (km^2)	比例 Ratio (%)
高度适宜 Highly suitable	≥0.836	1 622	19.35	36.893 6	19.80
适宜 Suitable	0.805~0.836	2 904	34.64	61.948 0	33.25
勉强适宜 Barely suitable	0.770~0.805	2 885	34.41	60.889 8	32.68
不适宜 Unsuitable	<0.770	973	11.60	26.595 4	14.27

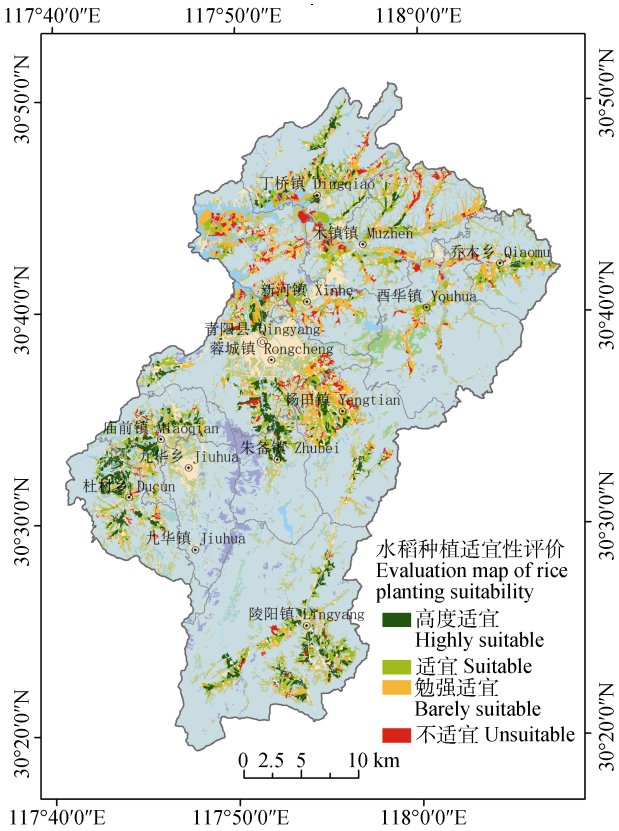

图 2　研究区水稻种植适宜性空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of rice planting suitability in the study area

图 3 中使用水稻籽实中重金属 Cd 含量的实测值与水稻种植适宜性指数 RSI 建立关系，对应的相关系数为–0.292，P=0.04，小于 0.05，有统计学意义，两者之间表现出显著的负相关。在一定范围内随着 RSI 的增长，水稻籽实中重金属 Cd 的含量逐渐降低，重金属含量的降低意味着水稻品质的提高，同时也减少了可能通过食物链对生态环境造成的危害。由此，可以充分证明本文中基于土地质量地球化学数据，尤其是包括土壤重金属指标数据在内的水稻种植适宜性评价方法的正确性和适用性。

3　讨论

本研究在水稻种植适宜性评价研究中考虑到土壤重金属污染对农业生产的影响，特意将土壤环境指标所代表的土壤重金属污染情况作为参评因子，用于适宜性评价工作中。陈金涛[17]在 2009 年使用地形部位、成土母质、坡度、坡向、剖面构型、耕层厚度、耕层质地、pH、土壤养分、有机质、有效磷、速效钾、有效锌、排水和灌溉能力等 14 项指标对整个研究区的水稻种植适宜性进行了评价。其统计出的水稻种植适宜性评价中：“高度适宜”面积占比 21.7%，“适宜”面积占比 32.4%，“勉强适宜”面积占比 37.5%，“不适宜”面积占比 8.4%。本文的评价方法与其前人方法评价结果对比如表 7 所示。对比发现：两者评价出的“高度适宜”和“适宜”比例大致相当，本文评价结果中的“勉强适宜”和“不适宜”分别略低于和略高于前人方法。

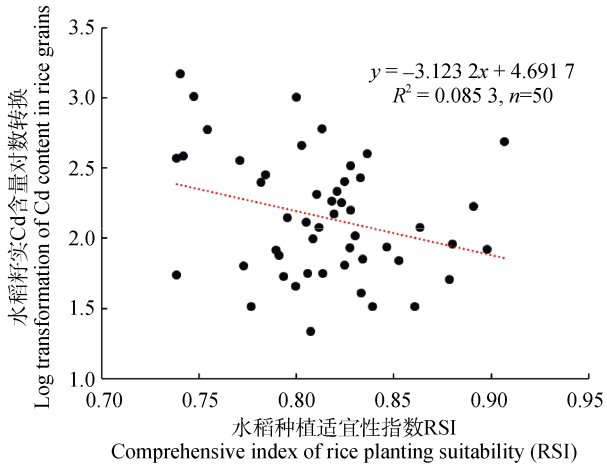

图 3　水稻籽实 Cd 含量与水稻种植适宜性综合指数之间的关系

Fig. 3　Relationship between Cd content in rice grains and the comprehensive index of rice planting suitability

表 7　本评价方法与前人评价方法的研究区水稻种植适宜性评价结果对比

Table 7　Comparison of evaluation results of rice planting suitability of the study area between this method and the previous one

适宜性 Suitability	面积比例 Area rate (%)	
	前人方法 Previous method	本文方法 This method
高度适宜 Highly suitable	21.70	19.80
适宜 Suitable	32.40	33.25
勉强适宜 Barely suitable	37.50	32.68
不适宜 Unsuitable	8.40	14.27

经评价指标对比和结果分析，我们认为：前人在水稻种植适宜性评价工作中以部分地学条件、土壤剖面组成、土壤养分条件和排水灌溉条件等作为评价指标，其中地形部位、成土母质、剖面构型等多项指标为描述性指标，这些指标打分量化严重依赖专家经验，其评价方法的主观性较强，且等级划分不明确。前人认为：“不适宜”地区是由排水灌溉条件差和山区冷浸田等因素引起的，也未给出“勉强适宜”地区的影响因素。本评价方法使用研究区的土地质量地球化学数据，数据客观真实，结果可信。通过对地球化学数据的研究发现：“高度适宜”地区是综合性能最好的耕地，田面平整，易于耕作，养分充

足，灌溉方便，保肥保水能力较强，不存在重金属污染，适于水稻生长；“适宜”地区立地条件较好，养分充足，不存在重金属污染等；“勉强适宜”地区土壤养分缺乏，部分土壤存在污染状况等；“不适宜”地区明显存在土壤重金属污染、土壤速效钾含量过低和灌溉能力差等多个不利因素。

土地质量地球化学评价是依据影响土地质量的营养有益元素、重金属元素及化合物、有机污染物、理化性质等地球化学指标，及其对土地基本功能的影响程度而进行的土地质量地球化学等级评定。该项工作的评价指标以土壤环境指标、土壤养分指标为主，以大气干湿沉降物环境质量、灌溉水环境质量为辅，综合考虑与土地利用有关的各种因素，以获取土地质量地球化学数据，实现土地质量的地球化学评价。GIS 技术是一种基于计算机的工具，它可以对空间信息进行分析和处理，并把地图这种独特的视觉化效果和地理分析功能与一般的数据库操作(例如查询和统计分析等)集成在一起。利用 GIS 技术和土地质量地球化学数据开展种植适宜性评价工作，不但可以全面掌握立地条件的优劣、土壤养分的丰缺分布、土壤重金属的污染等状况，减少评价工作中获取多个指标所需的大量人力工作，有效利用土地质量地球化学评价数据库，加快工作进度、提高评价结果的精确度，而且可以根据土地质量地球化学数据的空间特征，及时发现研究区土地质量的问题所在，为基本农田保护和土地整治圈定重点监测范围。

4 结论

本次研究在水稻种植适宜性评价中率先考虑到土壤污染对农业生产的影响，特意将土壤环境指标所代表的土壤重金属污染情况作为参评因子，通过计算获取水稻种植适宜性综合指数(RSI)，进行适宜性评价。本次水稻种植适宜性评价发现：研究区“高度适宜”面积约36.89 km^2，占基本农田区总面积的19.80%，主要分布在研究区中部及南部地区；“适宜”和“勉强适宜”面积分别为61.95 km^2和60.89 km^2，分别占33.25%和32.68%，分散分布；“不适宜”面积约26.60 km^2，占比14.27%，主要位于研究区中部及北部地区，中部主要受土壤养分不足的影响，北部主要受耕作条件和土壤重金属污染影响。该评价方法充分考虑土壤重金属污染对水稻种植和生态环境所带来的不利影响，并对研究区水稻种植做出一些区划调整，不仅为作物种植适宜性评价提供了新思路，而且为生态农业发展指明了方向，为土地资源优化利用提供了科学依据。

参考文献 References

[1] 黄勇，杨忠芳. 中国土地质量评价的研究现状及展望[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 207–211
HUANG Y, YANG Z F. Land quality evaluation in China: Present status and prospect[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 207–211

[2] 张侠，亢翠霞，刘珊. 山东省寿光市耕地集约利用评价研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 1971–1973
ZHANG X, KANG C X, LIU S. Assessment of intensive utilization of cultivated land in Shouguang City of Shandong Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(4): 1971–1973

[3] 刘国栋，崔玉军，刘立芬，等. 土地质量地球化学评价方法研究与应用：以黑龙江省宏胜镇为例[J]. 现代地质，2017, 31(1): 167–176
LIU G D, CUI Y J, LIU L F, et al. The study and application of land quality geochemical evaluation method: Illustrated by the case of Hongsheng Town, Heilongjiang Province[J]. Geoscience, 2017, 31(1): 167–176

[4] PADILLA-BERNAL L E, LARA-HERRERA A, REYES-RIVAS E, et al. Assessing environmental management of tomato production under protected agriculture[J]. International Food and Agribusiness Management Association, 2015, 18(3): (1030-2016-83049): 193

[5] 邓青春. GIS 支持下的农用地适宜性评价研究——以成都市龙泉驿为例[D]. 成都：四川师范大学, 2008: 4–6
DENG Q C. The application of GIS in the evaluation of farming land suitability — Taking Longquanyi District in Chengdu for example[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2008: 4–6

[6] 瞿华莹. 基于 GIS 的耕地后备资源适宜性调查评价与研究[D]. 昆明：昆明理工大学, 2009: 20–29
QU H Y. Evaluation and research on suitability of cultivated land reserve resources based on GIS[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009: 20–29

[7] 代磊，汪诚文，刘仁志. 宁波市土地生态适宜性评价分析[J]. 环境保护, 2006, 34(24): 40–42
DAI L, WANG C W, LIU R Z. Evaluation and analysis of land ecological suitability in Ningbo City[J]. Environmental Protection, 2006, 34(24): 40–42

[8] 叶延琼，李韵，章家恩，等. GIS 支持下的广东省水稻种植生态适宜性评价[J]. 湖南农业大学学报：自然科学版, 2013, 39(2): 131–136
YE Y Q, LI Y, ZHANG J E, et al. GIS-based ecological suitability evaluation for rice planting in Guangdong Province[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2013, 39(2): 131–136

[9] YOUSSEF A M, PRADHAN B, TARABEES E. Integrated evaluation of urban development suitability based on remote sensing and GIS techniques: Contribution from the analytic hierarchy process[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2011, 4(3/4): 463–473

[10] 何英彬, 陈佑启, 杨鹏, 等. 国外基于 GIS 土地适宜性评价研究进展及展望[J]. 地理科学进展, 2009, 28(6): 898–904
HE Y B, CHEN Y Q, YANG P, et al. An overview and perspective of alien land suitability evaluation study based on GIS technology[J]. Progress in Geography, 2009, 28(6): 898–904

[11] CHEN H S, LIU G S, YANG Y F, et al. Comprehensive evaluation of tobacco ecological suitability of Henan Province based on GIS[J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(4): 583–592

[12] 史同广. 基于 GIS 的山东茶园土地评价技术方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007: 8–20
SHI T G. Land evaluation for tea garden in Shandong Province based on GIS: Technology and methodology[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2007: 8–20

[13] 吴志刚, 潘永地, 张剑, 等. 基于 GIS 的地道药材温郁金种植适宜性评价[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(5): 648–652
WU Z G, PAN Y D, ZHANG J, et al. Suitability evaluation to planting area of *Curcuma wenyujin* based on GIS[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(5): 648–652

[14] 李文西, 张月平, 毛伟, 等. 水稻种植适宜性评价及指标选取研究[J]. 农学学报, 2013, 3(4): 19–24
LI W X, ZHANG Y P, MAO W, et al. Study on cultivated land suitability evaluation for rice and index determination[J]. Journal of Agricultural, 2013, 3(4): 19–24

[15] HUANG M, IBRAHIM M D, XIA B, et al. Significance, progress and prospects for research in simplified cultivation technologies for rice in China[J]. Journal of Agricultural Science, 2011, 149(4): 487–496

[16] 李平, 万超, 王维薇. 中国大米进出口形势及预测分析[J]. 农业经济, 2017, (11): 116–118
LI P, WAN C, WANG W W. Chinese rice import and export situation and forecast analysis[J]. Agricultural Economy, 2017, (11): 116–118

[17] 陈金涛. 安徽省县域耕地地力评价与施肥管理(青阳县卷)[M]. 芜湖: 安徽师范大学出版社, 2014: 6–77
CHEN J T. Fertility Evaluation and Fertilization Management of Farmland in Qingyang County, Anhui Province[M]. Wuhu: Anhui Normal University Press, 2014: 6–77

[18] 王莉莎. 基于决策树的双季稻区水稻土地力特征分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013: 8–12
WANG L S. The analyzing of paddy soil fertility characteristics for the double-rice cropping region based on decision tree[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013: 8–12

[19] 聂文芳. 基于 GIS 的广德县耕地水稻种植适宜性定量评价[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(21): 148–150
NIE W F. The suitability and quantitative evaluation of cultivated rice cultivation in Guangde County based on GIS[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2010, 16(21): 148–150

[20] 贾尚霞. 霍邱县水稻适宜性评价[J]. 农技服务, 2013, 30(4): 368–369
JIA S X. Evaluation on suitability of rice in Huoqiu County[J]. Agricultural Technology Service, 2013, 30(4): 368–369

[21] 邓青军, 唐仲华, 陈敏知, 等. 江汉平原冷浸田水稻种植适宜性综合评价[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(3): 60–64
DENG Q J, TANG Z H, CHEN M Z, et al. Suitability assessment of cold spring paddy soil for rice planting in Jianghan Plain[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(3): 60–64

[22] 梁成权, 庄恒扬, 高辉, 等. GIS 技术在水稻优质高产栽培中的应用研究进展[J]. 中国稻米, 2013, 19(2): 14–17
LIANG C Q, ZHUANG H Y, GAO H, et al. The application of GIS technology in rice high yield and high yield cultivation[J]. China Rice, 2013, 19(2): 14–17

[23] 孙园园, 徐富贤, 孙永健, 等. 四川稻作区优质稻生产气候生态条件适宜性评价及空间分布[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 506–513
SUN Y Y, XU F X, SUN Y J, et al. Suitability evaluation of eco-climatic conditions for high quality rice production in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 506–513

[24] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(2): 750–759

[25] 赵凤霞, 王正平, 宋学立, 等. 我国与欧盟主要农产品的重金属限量标准比较[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(3): 161–166
ZHAO F X, WANG Z P, SONG X L, et al. Comparison of heavy metal maximum residue limit standard in main agricultural products between China and EU[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(3): 161–166

[26] 武小燕. 安徽省水稻种植机械探索研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015: 1–2
WU X Y. Research on the mechanization of rice planting in Anhui Province[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015: 1–2

[27] 江永红. 安徽省环境保护问题研究[J]. 理论建设, 2007, (1): 14–16
JIANG Y H. Research on environmental protection in Anhui Province[J]. Theory Research, 2007, (1): 14–16

[28] 安徽省土壤普查办公室. 安徽土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1–20
Anhui Soil Census Office. Anhui Soil[M]. Beijing: Science Press, 1996: 1–20

[29] 姚飞. 池州市土壤现状分析[J]. 科技信息, 2006, (9): 218–219
YAO F. Analysis of soil status in Chizhou City[J]. Science & Technology Information, 2006, (9): 218–219

[30] 刘朝亮. 层次分析法在农业系统中的应用研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(13): 228–232
LIU Z L. Study on application of AHP in agricultural system[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(13): 228–232

[31] 王升堂. 安徽省舒城县土地适宜性评价研究[J]. 六安师专学报, 1999, 15(2): 52–56
WANG S T. Research on suitability evaluation of Shucheng County[J]. Journal of Liu'an Teachers College, 1999, 15(2): 52–56

[32] 胡茂泳. 影响水稻适宜性的因素浅析[J]. 吉林农业, 2011,

(5): 197
HU M Y. Analysis on the factors affecting the suitability of rice[J]. Jilin Agriculture, 2011, (5): 197

[33] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148–153
GUO J Y, ZHANG Z B, SUN Q Y. Study and applications of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148–153

[34] 陈红翔. 主要农作物适宜性评价与区划研究——以宁夏中宁县为例[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(1): 76–77
CHEN H X. Suitability evaluation and regionalization study on main crops[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(1): 76–77

[35] 国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Determination of Land Quality Geochemical Evaluation[S]. Beijing: China Standard Press, 2016

[36] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. GB 15618—2018 Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land[S]. Beijing: China Standard Press, 2018