



陈露, 潘启迪, 郭文华, 李超, 肖飞, 张玉韩, 孙丹峰, 孙强强. 基于限制性因子法的农用地适宜性评价研究——以石羊河流域为例[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(05): 181-196.

CHEN Lu, PAN Qidi, GUO Wenhua, LI Chao, XIAO Fei, ZHANG Yuhua, SUN Danfeng, SUN Qiangqiang. Study on the suitability evaluation of agricultural land based on restrictive factor method: Taking Shiyang River Basin as study case[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(05): 181-196.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.17

基于限制性因子法的农用地适宜性评价研究 ——以石羊河流域为例

陈露¹ 潘启迪¹ 郭文华² 李超³ 肖飞² 张玉韩² 孙丹峰^{1,4} 孙强强^{1,4*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;

2. 自然资源部信息中心, 北京 100036;

3. 中国国土勘测规划院, 北京 100035;

4. 中国农业大学 土地利用与管理研究中心, 北京 100193)

摘要 为开展农用地适宜性评价, 利用文献计量法, 聚焦土地自然属性, 基于气候、土壤、地形、水文等自然地理条件, 梳理农用地适宜性影响因素, 选取12个指标构建土地宜耕、宜园、宜林、宜草性评价体系。基于限制性因子法与IOAO原则筛选不适宜区, 针对适宜区利用综合评价法考虑适宜程度, 最终形成农用地适宜性评价标准, 并以2020年石羊河流域为实证区开展验证。结果表明: 2020年石羊河流域内仅有2.69%的土地属于耕地适宜区, 42.96%不适宜发展耕地; 园地适宜区有17.08%, 不适宜区有19.12%; 林地适宜区有10.27%, 不适宜区有6.17%; 研究区域内无草地不适宜区, 适宜区有12.93%。本研究根据2020年研究区土地覆被现状与2010—2020年农用地转化等实际情况, 验证上述评价结果是否合理, 结果表明仅存在3.76%的耕地分布在耕地不适宜地区、林地不适宜区没有林地分布, 农用地转入和转出也主要分布于一般适宜区和适宜区, 基本上符合因地制宜发展, 证实了评价指标体系及评价标准的合理性与可行性。因此, 利用限制性因子法开展适宜性评价贴合实际, 能够为未来农业生产空间布局提供支撑。

关键词 农用地适宜性; 限制性因子; 农用地转化; 石羊河流域

中图分类号 F301

文章编号 1007-4333(2024)05-0181-16

文献标志码 A

Study on the suitability evaluation of agricultural land based on restrictive factor method: Taking Shiyang River Basin as study case

CHEN Lu¹, PAN Qidi¹, GUO Wenhua², LI Chao³, XIAO Fei², ZHANG Yuhua²,
SUN Danfeng^{1,4}, SUN Qiangqiang^{1,4*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Information Center of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100136, China;

3. China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China;

4. Center of Land Use and Management Research, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The evaluation of agricultural land suitability is crucial for adjusting agricultural spatial patterns

收稿日期: 2023-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001234, 42071252); 自然资源部信息中心项目(202213B210601)

第一作者: 陈露 (ORCID: 0009-0009-6223-7429), 硕士研究生, E-mail: chenlu@cau.edu.cn

通讯作者: 孙强强 (ORCID: 0000-0003-2017-6743), 副教授, 主要从事土地系统分析研究, E-mail: qiangsun@cau.edu.cn

and formulating land use strategies to meet the national food security requirements and the increasingly diverse food consumption demands of the people. Employing the method of bibliometrics, this study focuses on the natural attributes of land and analyzes the impact factors of agricultural land suitability based on natural geographic conditions such as climate, soil, topography, and hydrology. Twelve indicators were selected to establish the evaluation system for land suitability for cultivated land, garden, woodland and grassland. Based on the restrictive factor method and the 10AO principle, unsuitable areas are screened. The comprehensive evaluation method was applied to assess the suitability of the suitable areas. Finally, the agricultural land suitability evaluation standards are formed, and verification is carried out using the Shiyang River Basin in 2020 as test area. The results show that: Only 2.69% of the land in the Shiyang River Basin in 2020 is suitable for cultivated land, and 42.96% is not suitable for the development of cultivated land. The suitable area for garden is 17.08%, and the unsuitable area is 19.12%. The suitable area of woodland is 10.27%, and the unsuitable area is 6.17%. There is no unsuitable area for grassland in the study area, and the suitable area is 12.93%. This study verified whether the above evaluation results are reasonable based on the actual situation of land cover in 2020 and agricultural land conversion from 2010 to 2020 in the study area. The results show that only 3.76% of cultivated land is distributed in unsuitable areas for cultivated land, and there is no woodland in unsuitable areas for woodland. The transfer of agricultural land in and out is also mainly distributed in generally suitable areas and suitable areas, which is basically in line with development based on local conditions. Confirmed The rationality and feasibility of the evaluation index system and evaluation standards are confirmed. Therefore, using restrictive factors to carry out suitability evaluation in this study is realistic and can provide support for future agricultural production spatial layout.

Keywords suitability of agricultural land; restrictive factors; agricultural land conversion; Shiyang River Basin

在全球气候变化、大国博弈、耕地保护主义蔓延的背景下,确保中国粮食安全,已经成为国家的重大战略需求^[1]。同时,随着城乡居民的收入水平不断提高,居民食物消费结构由单一向多元化发展^[2]。二十大报告中要求“树立大食物观,发展设施农业,构建多元食物供给体系”,“由‘吃得饱’向‘吃得好’转变”,大食物观旨在保护好生态环境的前提下,全方位多途径开发食物资源,向草原、森林、江河湖海要食物,实现从耕地资源向整个国土资源拓展,由此可以看出,“大食物观”实际上是对更高水平、高质量的国土空间开发与保护格局提出的要求,也是对实现国土资源可持续利用的一种考量^[3]。夯实粮食生产基础,确保重要农产品供给能力,这意味着在新时代,农用地资源的利用不能仅仅关注耕地保护和粮食产量问题,还需要关注其他农产品的质量 and 数量,以及其获取途径的保障。依据“宜耕则耕”“宜园则园”“宜林则林”“宜草则草”的基本原则,对农用地资源的合理利用与布局提出新的要求。立足土地自然属性,全面、科学判定耕、园、林、草4种农用地的适宜性状况^[4],为提出合理的农用地空间生产格局提供支撑,促进我国国土空间格局

优化和可持续利用模式建立^[5]。

国内外对土地适宜性评估从不同方面开展了研究,目前在研究内容方面大多面向矿区土地复垦^[6-7]、未利用地开发^[8-9]、居民点整治^[10-11]、农业生产^[12-15]、可持续发展^[16]开展土地适宜性评估;在研究方法方面,目前已发展了层次分析法^[17]、限制性因子法^[18]、模糊数学分析法^[19]、灰色关联分析法^[20]等方法。其中,限制性因子法可以根据不同地区不同地类控制不同指标进行评价,通过控制不同指标对可行方案进行筛选与评估,选择满足最多限制条件的最优方案,此方法考虑多个因素和约束条件,能够在有限的资源环境下做出更合理的决策,相对其他方法更加灵活、准确^[21],能够快速有效地支撑土地适宜性评估,但是当前的适宜性评价研究中限制性因子评价法较少受到关注与应用;土地适宜性评估对象主要以建设用地^[22]、耕地^[23-24]、园地^[25]等为主,而专门针对耕、园、林、草4种农业用地的综合性适宜性评价却鲜有研究。在新时代“大食物观”的发展目标下,全面了解耕地、园地、林地以及草地等农业用地的质量和生态状况已经成为大势所趋,所以迫切需要制定一个可以全面评估耕地、园地、林

地和草地等农业用地的适宜性评价标准。

因此,本研究拟首先利用限制性因子法,结合1OAO(One Out, All Out)原则,针对土地宜耕、宜园、宜林、宜草进行评价,综合考虑气候、地形地貌、土壤、水文等方面的因素,基于文献计量分析农用地适宜性影响因素,构建农用地适宜性评价指标体系及评价标准,基于此评价标准为解决我国农用地资源利用格局优化等问题提供方法依据。并且以石羊河流域为实证区开展农用地适宜性评估,之后以GlobeLand30数据为例,分析石羊河流域目前农用地转化的科学性,并为以后有序引导石羊河流域根据农用地适宜性条件推进农业结构调整,进一步提升农地质量、优化农用地空间分布格局提供支撑。

1 农用地适宜性评价框架构建

1.1 评价指标确定

鉴于国内外已经在耕地、园地、林地及草地方面开展了大量研究,本研究利用文献计量法,收集与整

理国内外专家学者针对农用地适宜性评价的实证研究,对国内外核心数据集中的文献资料进行科学定量分析,在中国知网(CNKI)和Web of Science检索耕地-林地-草地-园地影响因素及评价指标的研究,共获得近150条有效数据,利用CiteSpace开展各研究指标的共现网络分析^[26],获取其出现频次以及在网络中的关键性,结果见图1,因此,基于知识图谱计量分析,从气候、地形地貌、土壤、水文等自然地理条件出发,初步筛选出积温、降雨量、海拔、坡度、坡向、土壤有机质、土壤质地、土壤厚度、土壤pH、距河流距离、排水条件、距道路距离、距居民点距离等13项评价指标,考虑到指标的重要性的和资料的可获得性,结合实际情况及专家知识,开展基于问卷的调研分析,基于专家知识的指标重要性及可行性分析结果见图2。可见:由于排水条件在各项适宜性评价中的重要性及其获取可行性评分较低,最终将排水条件剔除,确定5个准则层的12个评价因子来构建土地宜耕、宜园、宜林、宜草评价指标体系。

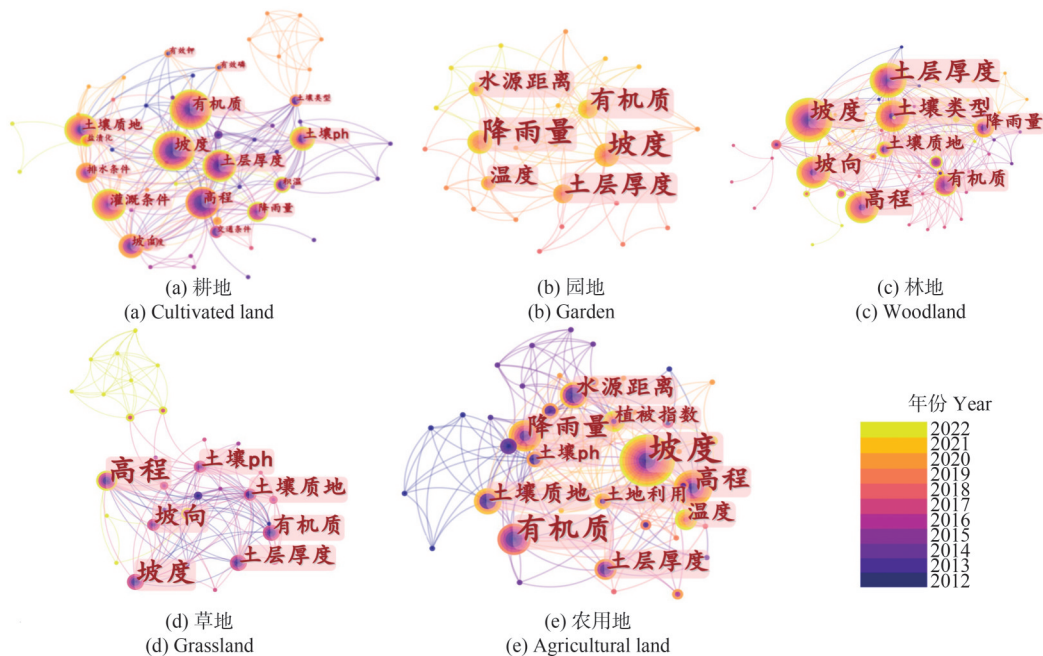


图1 各类农用地适宜性评价指标体系知识图谱分析

Fig. 1 Knowledge graph analysis of the suitability evaluation index system for various types of agricultural land

1.2 适宜性评价模型

1.2.1 限制性因子法

限制性因子法(Restrictive Factor Method)是一种多因素决策方法,用于在资源有限的条件下,选择能够满足最多约束条件的方案^[21]。限制性因子法的

不同之处在于可以根据不同区域环境设置不同的指标阈值进行综合评价,能够在有限的资源条件下做出合理决策。限制因子是使生物的生长发育受到限制甚至死亡的生态因子^[22]。在农用地适宜性评价过程中,农作物、果树、林和草的生存取决于气候、地形、土

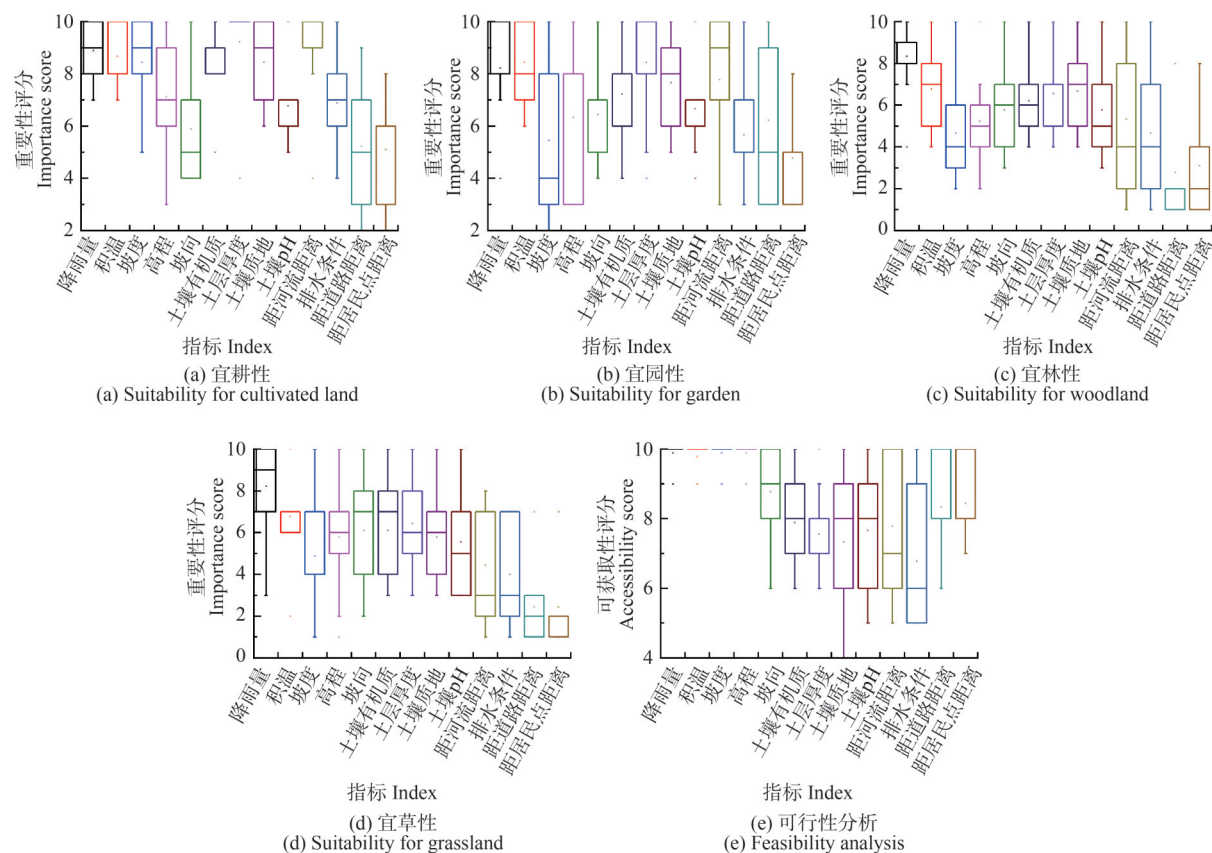


图2 基于专家知识的不同指标重要性评分及可行性分析

Fig. 2 Importance scoring and feasibility analysis of different index based on expert knowledge

壤、水文等因子的综合影响,其中任何条件如果超过阈值,就成为限制因子。因此在农用地适宜性评价过程中,需要针对不同的农用地类型设定不同的限制因子集^[27-28],各地类限制性因子集设置具体公式如下:

$$f_i = [\text{var}_1, \text{var}_2, \dots, \text{var}_n] \quad (1)$$

式中: f_i 为某地类的限制因子集; i 为地类; var 为地类 i 的限制因子。

1.2.2 1OAO原则

2017年《联合国防治荒漠化公约》提出1OAO原则进行土地退化程度评估。1OAO原则是指如果评价指标之一出现退化,则该土地单位将视为退化。该方法的优点是可以排除突然改变的指标导致评价结果不准确,近几年1OAO原则广泛应用于许多国家的土地退化评估^[29],在本研究中用来进行农用地适宜性评价。

在农用地适宜性评价指标体系构建的基础上,采用限制性因子法,在限制性因子阈值确定的基础上,采用1OAO原则的方法开展不适宜草地、不适宜林地、不适宜园地和不适宜耕地区域的划分,即

一个地区是否适宜布局某种农用地类型取决于限制性因子,也就是按照限制性因子确定最终的评价等级,若超过限制性因子的阈值,则以限制性因子的“一票否决制”决定。

1.2.3 适宜性综合评价方法

适宜性综合评价方法的具体流程见图3。从宜耕、宜园、宜林、宜草的评价需求出发,应用气候、地形地貌、土壤、水文以及其他5方面的指标,根据限制性阈值设定,划分出不适宜地区,针对适宜区,综合考虑指标的重要性,对评价因子分等定级并赋予分值,通过咨询专家对选择的指标体系进行评估和打分,构建层次分析法的判别矩阵,得到12个评价指标的权重值,利用指标加权方法,实现适宜性程度评价,适宜性综合评价具体计算公式如下:

$$H_j = \sum_{a=1}^n S_a f_{aj} \quad (2)$$

式中: H_j 为第 j 类适宜性的综合评价分值; j 为适宜性评价的类别编号; a 为评价指标编号; n 为评价指标个数; S_a 为第 a 个评价指标的权重值; f_{aj} 为第 j 类适

宜性评价的第 a 个评价指标的分值。进行加权求和之后,将0~100的分值分为4种适宜性等级:0分为不

宜;0~40分为勉强适宜;40~80分为一般适宜;80分以上为适宜。

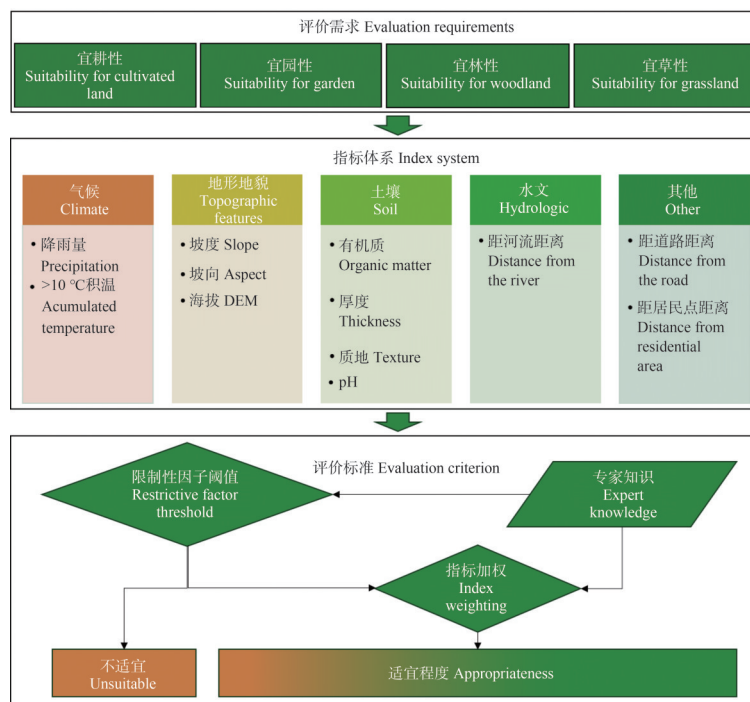


图3 农用地适宜性评价流程

Fig. 3 Process for evaluating the suitability for agricultural land

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省中部,河西走廊东段(101°22'~104°16'E, 36°29'~39°27'N),深居大陆腹地,属于大陆性温带干旱气候,昼夜温差大,降水少,蒸发强(图4)。石羊河流域是典型的生态脆弱区,历史上石羊河流域,拥有优越的自然条件和灌溉系统,石羊河上游地区有丰富的雪水资源,而石羊河是塔里木盆地的主要支流,这使得石羊河流域拥有了充足的水资源,农田得以高效耕种,让整个流域成为古代中国北方地区的重要农业区。然而,由于多年来不合理的资源利用方式对该流域生态环境造成破坏,目前已经成为我国生态问题最严重的内陆河之一^[30]。由于石羊河流域地势南高北低,自西南向东北倾斜,高原、丘陵、平原、沙漠多种地貌构成,具备了丰富的土地利用覆被类型及多样的气候、水文、地貌及土壤条件,景观异质性较强,在自然过程和人类活动的共同作用下,形成了典型的山地-荒漠-绿洲复合系统,是开展农用地适宜性评价的典型区域^[31]。

2.2 数据来源及处理

本研究所用到的气候数据如图5(a)和(b)所示。石羊河流域2020年逐月平均气温与逐月降雨量数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>),并使用ArcGIS栅格计算器筛选出逐月平均气温10℃及以上温度,并累加计算得出 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温。

本研究用到的地形地貌数据详见图5(c)~(e)。地形地貌数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),在ArcGIS中对数字高程模型(DEM)数据进行坡向分析、坡度分析,获得石羊河流域坡向与坡度数据以及高程数据。

所有土壤数据如图5(f)~(i)所示。本研究所用的土壤厚度、土壤质地、土壤有机质数据均来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心-土壤分中心(<http://soil.geodata.cn>)的现成数据集,分别为中国90 m土壤厚度数据集^[32]、中国1 km土壤质地分布数据集^[33]与中国1 km土壤有机质含量数据集,土壤pH来源于Soilgrid250(<https://soilgrids.org/>)获取的0~30 cm深的Soil

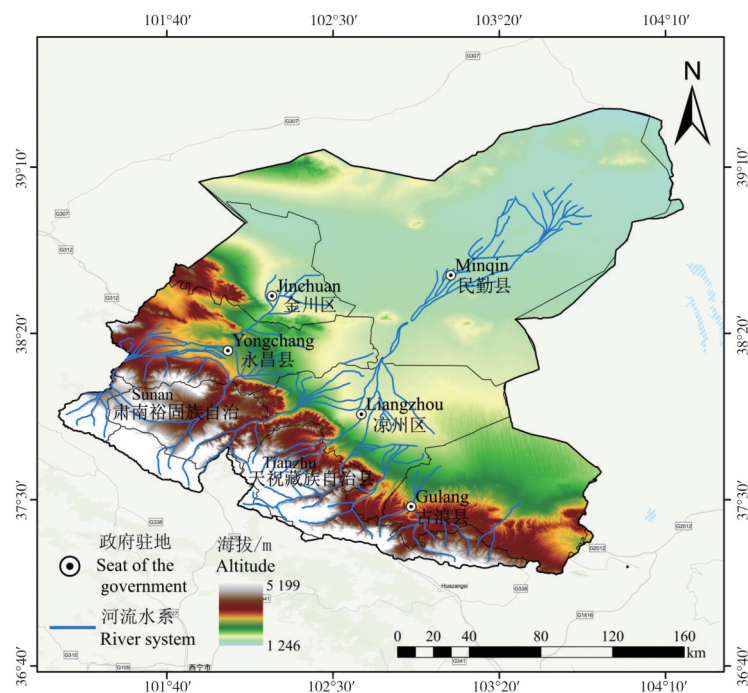


图4 研究区概况

Fig.4 Demarcation of the study area

pH Water,通过 ArcGIS 简单处理得到石羊河流域土壤pH分布。

水文与其他数据如图 5(j)~(l)所示。其中距河流距离所使用的石羊河流域河流分布数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),2020 年中国道路矢量数据来源于 OSM (<https://www.openstreetmap.org>),2020 年中国村级居民点分布数据来源于民政部、国家统计局等官方网站(中华人民共和国民政部-中华人民共和国行政区划代码、中华人民共和国国家统计局-统计用区划和城乡划分代码)发布的相关信息,整理成格式化文本数据,然后通过地理编码等处理,制作形成空间分布矢量点数据。

本研究使用的 2010 年、2020 年石羊河流域土地利用覆被数据来源于 GlobeLand30。GlobeLand30 是我国研发的全球首个 30 m 分辨率全球地表覆盖数据集,其中包含了丰富详尽的地表覆盖空间分布信息,该数据集的精度达到 80.30%,中国范围内的精度达到 82.39%,能准确地描述大多数人类土地利用活动及其所形成的景观格局^[34-35]。流域内共有 9 种覆被类型,分别为耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地表、裸地和冰川与永久积雪。

3 结果与分析

3.1 限制性因子确定

依据石羊河流域地域特点,根据专家知识通过对研究区的地理条件分析划分该地区适宜性评价限制性指标,如表 1 所示。

3.1.1 耕地限制性因子

将降雨量、积温、坡度、土壤厚度、土壤质地、土壤 pH 与距河流距离认定为耕地的限制性因子。

合适的降雨量与积温是农作物生长必备的条件之一。根据实地情况,北坡较南坡相对阴暗,光照较少,对作物的生长和发育产生不利影响,在高海拔地区,人们大多会选择种植高原耐寒作物,海拔与坡向并不是绝对限制农作物生长的因素,而坡度会影响水分流动和土壤侵蚀,陡峭的坡地会加速水土流失,对农作物生长非常不利。较厚的土壤厚度具有更大的水分储存能力,可以为农作物提供必要的养分和水分供应^[36]。土壤 pH 是指土壤溶液中氢离子(H^+)的浓度,合适的土壤 pH 有利于养分供给、微生物活动和根系的养分吸收,从而促进农作物的生长和发育;过酸或过碱的土壤 pH 会限制根系的吸收能力,导致养分缺乏和生长受限^[37]。由于

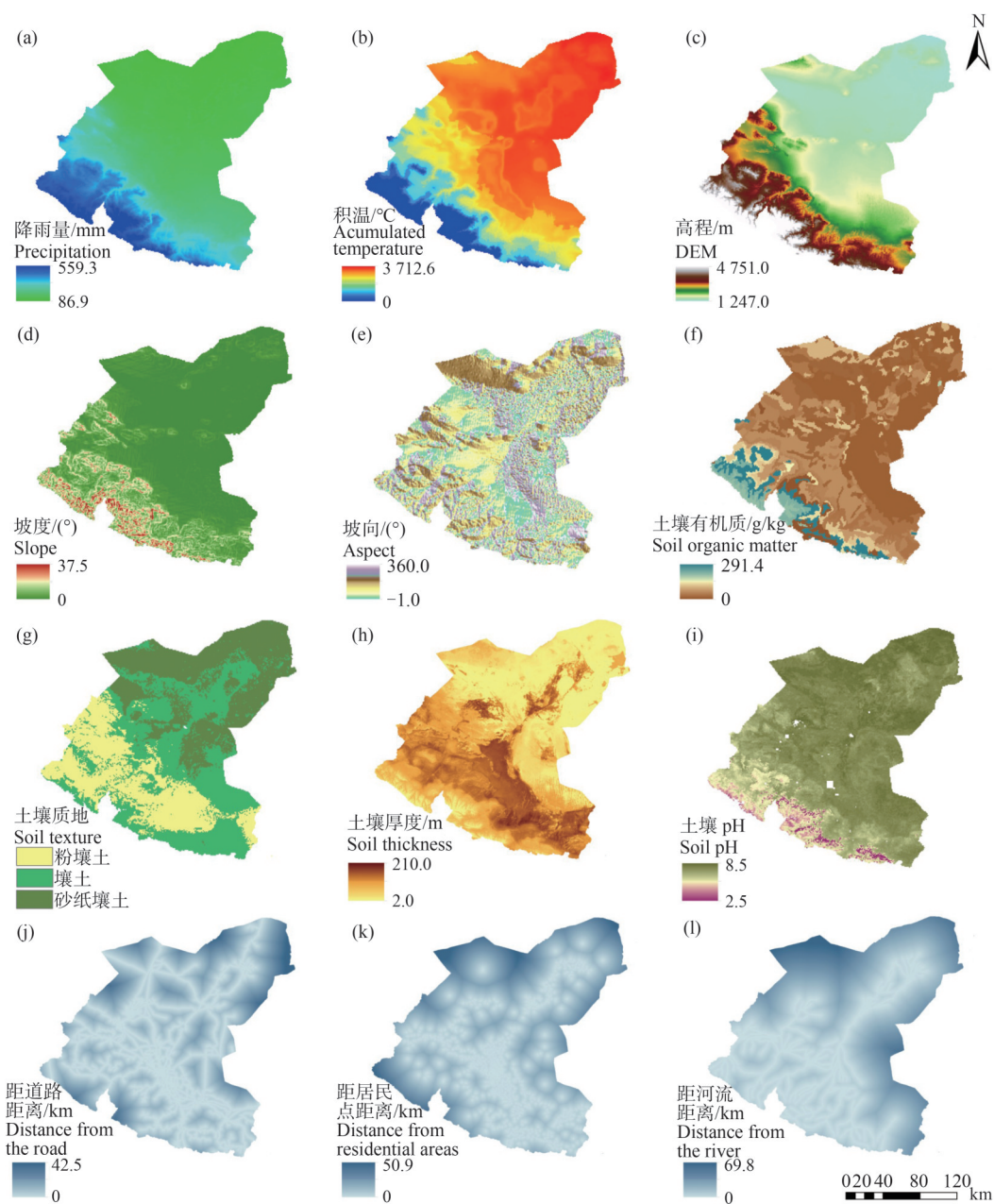


图 5 石羊河流域评价因子概况

Fig. 5 Overview of evaluation factors in the Shiyang River Basin

实证地区处于干旱区,适量的灌溉可以确保农作物的水分供应充足,防止干旱造成的生长停滞和萎蔫,因此本研究中同时考虑降雨量和距河流距离的情况来进行限制性因子的确定,当某区域的降雨量与距河流距离同时达不到农作物最低生长需求时,则将此区域认定为耕地不适宜区。

3.1.2 园地限制性因子

将降雨量、积温、土壤厚度、距河流距离划定为园地的限制性因子,与上述耕地限制因子确定相

同,园地限制性因子同时考虑降雨量与距河流距离的情况。园地指以采集果、叶、根、茎、枝、汁等为主的集约经营的多年作物的土地^[38],多年生作物相对于一年生的农作物具有更长的生长周期,因此适应性更强,限制性因子较少。

降雨量和积温对多年生作物的生长、开花和结果有着直接的影响。另外,土壤的厚度影响着作物扎根深度,从而影响作物养分与水分的吸收能力,比如,在果树种植中,选择合适的土壤厚度和土壤

表1 农用地适宜性评价限制性因子

Table 1 Restrictive factors for suitability evaluation of agricultural land

准则层 Criterion layer	指标体系 Index system	限制性因子 Restrictive factor			
		宜耕性	宜园性	宜林性	宜草性
		Suitability for cultivated land	Suitability for garden	Suitability for woodland	Suitability for grassland
气候 Climate	降雨量 Precipitation	○	○	×	×
	积温 Accumulated temperature	○	○	×	×
地形地貌 Topographic feature	坡度 Slope	○	×	×	×
	坡向 Aspect	×	×	×	×
	高程 DEM	×	×	×	×
土壤 Soil condition	土壤有机质 Soil organic matter	×	×	×	×
	土壤厚度 Soil thickness	○	○	○	×
	土壤质地 Soil texture	○	×	×	×
	土壤pH Soil pH	○	×	×	×
水文 Hydrologic condition	距河流距离 Distance from the river	○	○	×	×
其他因子 Other factor	距道路距离 Distance from the road	×	×	×	×
	距居民点距离 Distance from residential area	×	×	×	×

注:○为限制性因子;×为非限制性因子。
Note: ○ is restrictive factor. × is not restrictive factor.

管理措施是保障果树健康生长和提高产量的重要因素。灌溉是干旱地区维持作物生长必不可少的条件之一。

3.1.3 林地、草地限制性因子

由于实证地区石羊河流域属于干旱沙漠气候,事实证明,在极为恶劣的气候条件下,仍然能够观察到植被(比如梭梭树、白刺等)的生长,说明降雨量和积温不应作为沙漠地区发展林草地的限制性因

素。土壤厚度通过影响根系的生长状况从而决定树木的生长状况。因此本案例中只把土壤厚度作为林地的限制性因子,草地不设限制性因子。

3.2 评价指标分级

针对构建的农用地适宜性评价体系,参考《农用地质量分等规程》《耕地质量等级》《园地分等定级规程》和《自然资源分等定级通则》^[39-42]以及相关研究^[43-45]对各级指标进行分级打分,详见表2。

表2 石羊河流域农用地适宜性评价指标分级及量化标准

Table 2 Grading and quantitative standard for the suitability index of agricultural land in the Shiyang River Basin

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	适宜性 Suitability	5级(0分) Level 5 (score 0)	4级(40分) Level 4 (score 40)	3级(60分) Level 3 (score 60)	2级(80分) Level 2 (score 80)	1级(100分) Level 1 (score 100)
气候 Climate	积温/℃	宜耕性	<1 800	1 800~3 000	3 000~3 500	3 500~4 000	≥4 000
		宜园性	<1 800	1 800~3 000	3 000~3 500	3 500~4 000	≥4 000
		宜林性		<3 000	3 000~3 500	3 500~4 000	≥4 000
		宜草性		<3 000	3 000~3 500	3 500~4 000	≥4 000

表 2（续）							
准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	适宜性 Suitability	5 级（0 分） Level 5 （score 0）	4 级（40 分） Level 4 （score 40）	3 级（60 分） Level 3 （score 60）	2 级（80 分） Level 2 （score 80）	1 级（100 分） Level 1 （score 100）
地形 地貌 Terrain and Landform	降雨量/ mm	宜耕性	<350	<450	450~600	600~800	≥800
		宜园性	<350	<450	450~600	600~800	≥800
		宜林性		<100	100~200	200~300	≥300
		宜草性		<150	150~300	300~400	≥400
	高程/m	宜耕性		≥3 000	2 000~3 000	1 000~2 000	≤1 000
		宜园性		≥3 000	2 000~3 000	1 000~2 000	≤1 000
		宜林性		≥2 550， ≤1 350	1 350~1 450， 2 200~2 550	1 450~1 550， 1 900~2 200	1 550~1 900
		宜草性		≥3 000	2 000~3 000	1 000~2 000	≤1 000
	坡度/(°)	宜耕性	≥25	15~25	8~15	2~8	<2
		宜园性		≥25	<6	15~25	6~15
		宜林性		≥25	15~25	5~15	<5
		宜草性		≥25	15~25	5~15	<5
	坡向/(°)	宜耕性		270~90	—1	90~135， 225~270	135~225
		宜园性		270~90	—1	90~135， 225~270	135~225
		宜林性		270~90	45~135， 225~315	135~225	—1
		宜草性		270~90	—1	90~135， 225~270	135~225
	土壤有机 质/（g/kg）	宜耕性		<10	20~30	30~40	≥40
		宜园性		<10	10~15	15~20	≥20
		宜林性		<10	10~15	15~20	≥20
		宜草性		<10	10~15	15~20	≥20
土壤 Soil	土壤质地	宜耕性	砾质土	砂土		黏土	壤土
		宜园性		砾质土	砂质土	黏土	壤土
		宜林性		砾质土	黏土	砂质土	壤土
		宜草性		砾质土	黏土	砂质土	壤土
	土壤厚度/ cm	宜耕性	<30	30~60	60~100	100~150	>150
		宜园性	<30	30~60	60~100	100~150	>150
		宜林性	<30	30~40	40~50	50~60	>60
		宜草性		<30	30~40	40~60	>60
	土壤 pH	宜耕性	<4，≥9.5	4.5~5.5，8.5~9	5.0~5.5	5.5~6.0， 7.9~8.5	6.0~7.9
		宜园性		<5.5，≥7.5	5.5~6.0	6.0~6.5	6.5~7.5
		宜林性		<5.5，≥7.5	5.5~6.0	6.0~6.5	6.0~7.5
		宜草性		<5.5，≥7.5	5.5~6.0	6.0~6.5	6.0~7.5

表2(续)

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	适宜性 Suitability	5级(0分) Level 5 (score 0)	4级(40分) Level 4 (score 40)	3级(60分) Level 3 (score 60)	2级(80分) Level 2 (score 80)	1级(100分) Level 1 (score 100)
水文 Hydrology	距河流距 离/km	宜耕性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜园性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜林性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜草性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
其他 Other	距道路距 离/km	宜耕性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜园性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜林性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜草性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
	距居民点 距离/km	宜耕性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜园性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜林性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2
		宜草性	≥20	10~20	5~10	2~5	≤2

3.3 评价结果及分析

依据限制性因子确定不适宜地区,在适宜区,利用适宜性综合评价模型计算得到宜耕性、宜园性、宜林性、宜草性的分值,评价结果见图6,具体结果如下。

3.3.1 宜耕性评价结果

由图6(a)可知:适宜发展耕地的地区在石羊河流域中南部,面积1 134.50 km²,仅占总面积的2.69%,该地区土壤厚度在60~200 cm,由于位于祁连山脚下,有丰富的冰雪融水,降雨量充沛,地势较平坦,灌溉方便,交通便利,并且没有极端的生态条件与经济条件,因此相较其他地区,该地区适宜进行农业耕作。一般适宜的地区共有15 836.38 km²,占流域总面积的37.53%,该区域从南到北都有分布,主要位于民勤县、永昌县等区县的绿洲区域,依水系分布,人口聚集,交通便利,但由于不可抗拒的干旱性沙漠气候因素,只能一般适宜发展耕地。勉强适宜的地区面积为7 098.77 km²,占总面积的16.82%,零散分布在流域各处。耕地不适宜的面积18 130.33 km²大约占区域总面积的42.96%,不适宜发展耕地的土地集中连片分布于北部的荒漠地区,荒漠地区土壤质量、水热条件较差;还有少量零散分布在南部高原地区,该区温度低,坡度陡,不适宜农作物的生长。

3.3.2 宜园性评价结果

由图6(b)可知:适宜发展园地的地区主要分布

于金川区、凉州区等水系发达冰雪融水补给丰富的区域,覆盖面积7 209.40 km²,占整个石羊河流域总面积的17.08%,果树相对于农作物来说具有更强的适应性,并且一些果树对于特定的土壤类型、气候条件或者高寒地区更加具有适应性,因此石羊河流域适宜发展园地的土地面积相较耕地更加广泛,此外,该地区水热条件较好,土壤条件适宜,灌溉能够满足用水需求,满足果树等生长的条件。一般适宜的地区共有13 454.59 km²,占流域总面积的31.88%,分布于石羊河流域南部以及民勤地区。勉强适宜的地区面积为13 215.97 km²,占总面积的31.32%,零散分布在流域各处。石羊河流域不适宜果园种植的地区主要分布于北部的沙漠地区,少数在南部高原地区,面积8 320.04 km²,该地区占石羊河流域总面积的19.12%。南部高原地区平均海拔在3 000 m以上,地势陡峭,土壤保水保肥能力较差,北部荒漠地区的土壤厚度不足30 cm,主要由砂质土壤组成,土壤肥力较低,果树难以在此类环境中生长。

3.3.3 宜林性评价结果

实证地区宜林性评价结果有明显的南北分布差异。由图6(c)可知:适宜发展林地的土地分布在流域南部,面积4 333.94 km²,占石羊河流域总面积的10.27%,该地区虽然海拔高,但水量充沛,既有丰富的降水又有冰雪融水,适宜耐寒性树木生长。一般适宜的地区共有18 053.33 km²,分布广泛,南

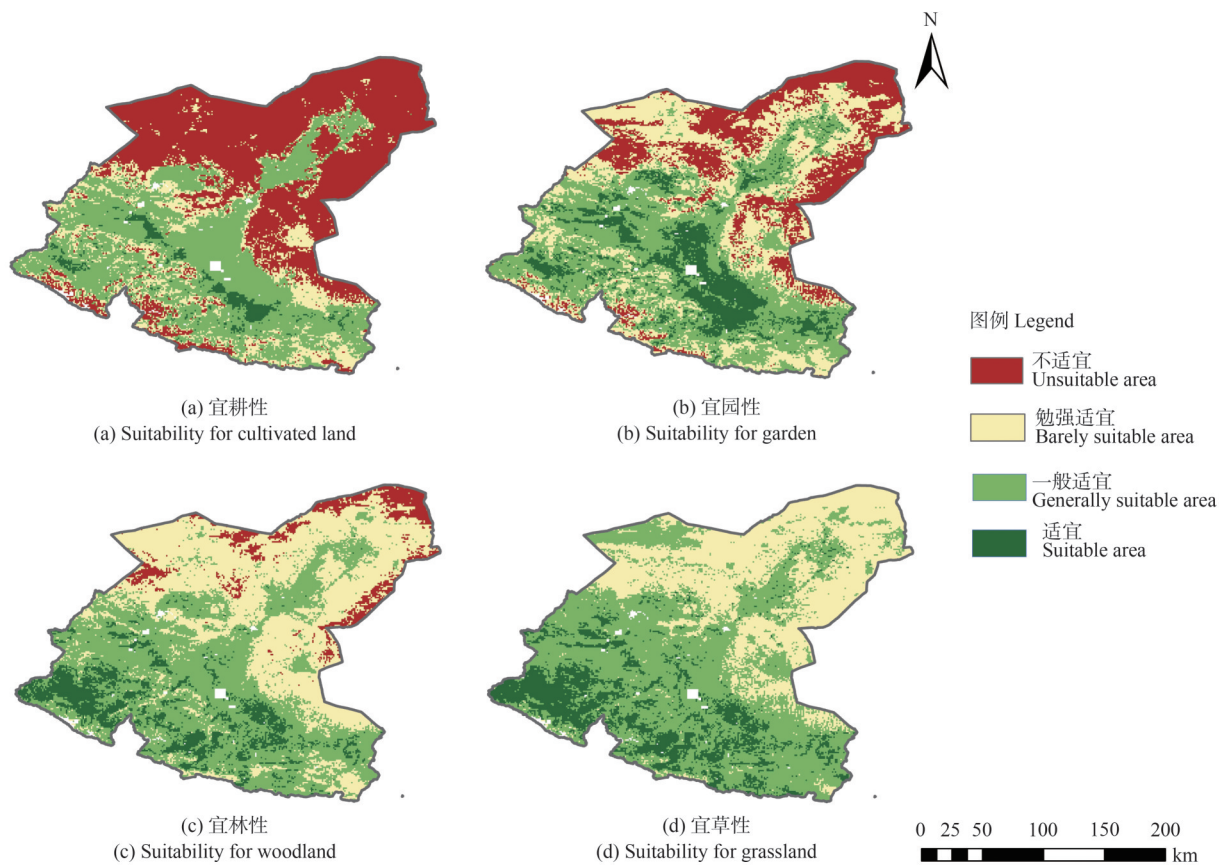


图6 2020年石羊河流域农用地适宜性评价结果

Fig. 6 Suitability evaluation of agricultural land in the Shiyang River Basin in 2020

北各有分布,占流域总面积的42.78%,南部水资源较北部充足,因此有大片一般适宜区分布。勉强适宜的地区面积为17 207.34 km²,占总面积的40.78%。林地不适宜的面积2 603.74 km²约占区域总面积的6.17%,不适宜发展林地的土地分布于北部边缘的荒漠地区,实证地区的林地主要受到土壤条件的约束,荒漠地区土壤厚度和土壤质地的条件无法满足树木生长。

3.3.4 宜草性评价结果

宜草性适宜程度自南向北递减的空间分布特征。由图6(d)可知:适宜发展草地的地区在石羊河流域南部,面积5 454.93 km²,占石羊河流域总面积的12.93%。一般适宜的地区共有21 679.85 km²,占流域总面积的51.38%,分布于南部以及民勤绿洲地区。勉强适宜的地区面积为15 030.18 km²,占总面积的35.68%,分布于北部沙漠地区。需要指出的是,草地生长具有较强的适应性,可以在炎热且降雨稀少的沙漠地区,以及地势陡峭的高原地区生长,因此本研究的评价结果中并未发现任何不适

宜发展草地的区域。

3.4 评价结果验证

3.4.1 土地利用覆被与适宜性

为验证本研究提出的适宜性评价体系的准确性,并识别出石羊河流域现有农业布局的改进空间,依据农用地适宜性评价的结果,结合石羊河流域土地覆被数据进行综合分析。

如图7(a)所示:2020年石羊河流域的耕地分布于中部以及北部的民勤县,主要属于适宜和一般适宜耕种区域,耕地不适宜地区由于土壤和水热条件的极度恶劣,只有3.76%的耕地分布在此;位于西部永昌县和金川区的部分地块属于耕地一般适宜地区,未来农业发展可以因地制宜,适当的发展为耕地或园地。此外,林地在本区域内的分布较少,仅分布于南部的高原地区,此处海拔高、水量充沛,属于适合林业的地区。其中,面积最大的分布于一般适宜区,共有688.55 km²;其次是适宜区,面积为596.67 km²,勉强适宜区有83.02 km²分布,在这些区域中还有少量的裸地未被利用,未来这

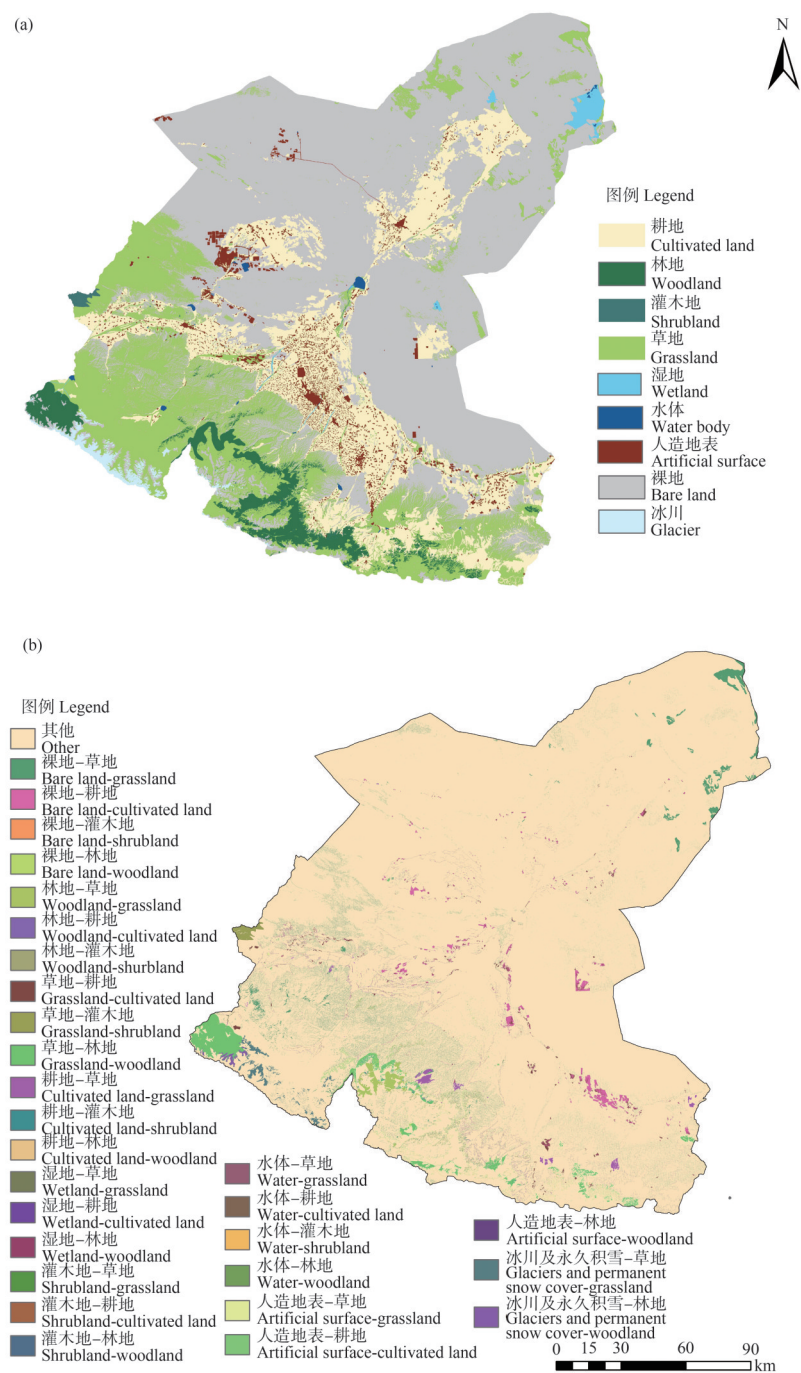


图7 2020年石羊河流域土地覆被(a)与2010—2020年农用地转化(b)

Fig. 7 Land cover of the Shiyang River Basin in 2020 (a) and agricultural land conversion from 2010 to 2020 (b)

些地区可以考虑进行植树造林,以保持水土,位于流域北部的民勤县,虽然被沙漠包围,气候恶劣,但在一般适宜林地的地区,也可以通过种树来防风固沙,调节气候状况。由于草的生长适应性极强,草地的分布相较广泛,62.74%的草地分布在草地一般适宜区,28.21%的草地分布在草

地适宜区,少数则零散分布在北部沙漠的不适宜地区。

3.4.2 农用地转化和适宜性

利用2010和2020年2期土地利用覆被结果(图7(b))开展区域农用地变化分析,并且统计不同适宜性分级区域的农用地变化面积(表3)。2010—

表 3 2020 年不同适宜区对应土地利用覆被及变化面积

Table 3 Corresponding land use and cover change areas of different suitable areas

适宜性类别 Suitability category	适宜性分级 Suitability level	对应地类面积比例 / % Proportion of corresponding land cover types	不变 / km ² Unchanged	转入 / km ² Change into	转出 / km ² Transfer out
耕地适宜性 Suitability for cultivated land	不适	3.76	66.17	34.40	127.95
	勉强	13.46	778.26	118.24	49.45
	一般	74.48	4 334.17	174.14	449.33
	适宜	8.30	322.48	18.27	25.80
林地适宜性 Suitability for woodland	不适	0.00	6.00	0.00	15.55
	勉强	6.07	64.50	23.65	3.22
	一般	50.32	451.48	292.38	110.72
	适宜	43.61	203.16	196.71	33.32
草地适宜性 Suitability for grassland	不适	0.00	0.00	0.00	0.00
	勉强	9.06	394.50	177.37	55.90
	一般	62.74	3 724.67	512.75	737.41
	适宜	28.21	2 222.98	205.31	486.95

2020 年,石羊河流域农用地之间的转化中,草地与林地之间的转化最多,草地转向林地共 534.37 km²,占流域总面积的 1.27%,广泛分布在区域南部,林地转向草地面积达 156.32 km²,集中连片分布于南部中心地带;草地转到耕地共 151.90 km²,零散分布在石羊河流域各处;草地转向灌木地面积共 78.72 km²,主要分布在西南部。其他地类转向农用地的状态下,裸地向草地转化面积最多,大部分分布于北部的荒漠地区;其次是裸地转向耕地,转移了 291.81 km²,主要沿水系分布。

由表 3 可知:耕地在不适宜区以耕地类型的转出为主,是该分区耕地保有量的近 2 倍。在适宜区,耕地的保有量及转出的主要分布区为一般适宜区,该区域也是石羊河流域耕地适宜性的主导区域,而适宜区的耕地保有量最低,是勉强适宜区的一半,该区域耕地的变化也较弱,这与该区域整体面积较少关系密切。对于林地来说,林地在不宜区的保有量较低,而且不存在转入情况,转出面积较多。林地保有量主要分布于一般适宜区及适宜区,其中一般适宜区林地保有量是适宜区林地保有量的 2 倍以上,同时林地的变化也主要分布于一般适宜区,且主要以耕地的转入为主,是转出的 2 倍。对于草地来说,草地在不适宜性区不存在分布,也没有相应的变化。草地保有量主要分布于一般适宜区及适宜区,其中一般适宜区草地保有量相比于适宜区草

地保有量接近 2 倍,草地的转入和转出也主要分布于一般适宜区,转出面积是转入面积的 1.5 倍。

4 讨论与结论

土地适宜性评价是一切土地工作的基础,本研究基于限制性因子法,针对宜耕、宜园、宜林、宜草 4 种自然属性构建了农用地适宜性评价体系与标准,实证研究在石羊河流域实现,结果证明该方法提出的评价标准是可行的,弥补了现有研究中在农用地评价体系中的不足。我国地域辽阔,区域异质性强,本研究并非提出一种在全国各地通用的评价体系,而是提出了一种评价原则与思想,在实际的适宜性评价中,评价标准并不固定,在未来其他地区的评价中,有必要在限制性因子选择与阈值确定方面加强区域异质性及特色的研究。在新时代“大食物观”的背景下,在农用地适宜性评价基础上,根据当地土地资源现状,充分培育和发展适用于当地农用地资源的农业利用模式,尤其是农产品优势种植区和地理标志产品等具有明显地域特征的模式。依据农用地适宜性的原理,发挥精细遥感技术的作用,准确、快速获取各区域内各种名优农(畜)产品的面积、分布以及产量的优势,厘清各地区名优农(畜)产品资源开发利用程度,为地区性名优农(畜)产品开发及农(畜)产业助力乡村振兴提供支撑^[46-48]。做好土地适宜性评价研究要求今后的工作

不仅仅是摸清土地资源的数量、类型、权属等,更要认清土地资源的质量以及适宜性,构建有中国特色的绿色种植制度、农产品供给动态调节机制、农业生态治理模式,推进轮作休耕制度化常态化实施。

此外,在面向我国食物消费结构多元化转变的压力下,树立大食物观,调整农业生产结构来满足食物需求,打破食物来源于耕地的传统农业思维,根据农用地适宜性,提高农用地利用效率,向耕地、园地、林地、草地等资源全方位多途径开发丰富多样的食物资源^[2]。土地是人类食物最重要的来源地,如何可持续地利用有限的土地资源来满足人们的食物需求是未来中国食物安全面临的最重大挑战之一^[49-50]。

本研究通过文献计量法选取评价指标,并设置限制性因子,采用IOAO原则开展不适宜草地、不适宜林地、不适宜园地和不适宜耕地区域的划分,对于适宜区,开展了石羊河流域草地、林地、园地及耕地的适宜性程度评价,主要结论如下:

1)石羊河流域农用地适宜性分布空间格局呈现典型的南北差异特征,适宜程度自南向北递减。南部海拔高,但是降水充沛,适宜发展耕地、园地、林地、草地,南部极少数高寒地区与北部的沙漠地区不适宜农业发展;研究区的耕地作物主要为玉米,果树种植一般为沙漠蜜瓜,结合评价结果耕地、园地最适宜的地区分布于流域中心地区,这里地势平坦、灌溉方便,交通便利,是未来发展农业资源最适宜的地区。

2)对比评价结果与土地利用覆被情况及农用地转化情况,发现评价结果与实际情况相符合。研究区内的耕地、林地、草地基本上都分布于适宜区,2010—2020年农用地的转移基本是由不适宜区向适宜区转移,说明了该阶段石羊河流域的土地利用符合因地制宜发展原则,生态环境得到改善,也进一步验证了本研究所设计的指标体系和评价标准的合理性和可行性。

参考文献 References

- [1] 魏后凯,叶兴庆,杜志雄,樊胜根,罗必良,刘守英,黄承伟. 加快构建新发展格局,着力推动农业农村高质量发展:权威专家深度解读党的二十大精神[J]. 中国农村经济, 2022(12): 2-34
Wei H K, Ye X Q, Du Z X, Fan S G, Luo B L, Liu S Y, Huang C W. Accelerating the construction of a new development pattern and promoting high-quality development of agriculture in rural areas: An in-depth interpretation by authoritative experts of the spirit of the 20th national congress of the communist party of China[J]. *Chinese Rural Economy*, 2022(12): 2-34 (in Chinese)

- [2] 朱晶. 树立大食物观,构建多元食物供给体系[J]. 农业经济与管理, 2022(6): 11-14
Zhu J. Building up big-food view and constructing multi-food supply system[J]. *Agricultural Economics and Management*, 2022(6): 11-14(in Chinese)
- [3] 陈浮,李宇航,于昊辰,华子宜,马力,蒋非非.“大食物观”统领国土空间开发和保护格局重塑[J]. 中国土地科学, 2023, 37(4): 1-10
Chen F, Li Y H, Yu H C, Hua Z Y, Ma L, Jiang F F. Integrated food security thought towards the reconstruction of the territorial space development and protection patterns [J]. *China Land Science*, 2023, 37(4): 1-10 (in Chinese)
- [4] 张凤荣. 园地、林地和草地分等定级的思想原则和指标体系探讨[J]. 中国土地, 2020(10): 18-19
Zhang F R. Discussion on the ideological principle and index system of grading garden, woodland, and grassland[J]. *China Land*, 2020(10): 18-19 (in Chinese)
- [5] 刘立程,孙中孝,孟超,蔡玉梅,张倩. 中国农业自然资源评价指标体系构建研究[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 468-478, 501
Liu L C, Sun Z X, Meng C, Cai Y M, Zhang Q. Evaluating natural agricultural resources in China: A framework and system of indicators[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(2): 468-478, 501 (in Chinese)
- [6] 张玉臻,熊建华,叶剑平. 基于利益相关者视角的待复垦矿区土地再利用适宜性评价[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(1): 89-97
Zhang Y Z, Xiong J H, Ye J P. Suitability evaluation of mining-land reuse from the perspective of stakeholders[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, 37(1): 89-97 (in Chinese)
- [7] 王世东,刘毅,王新闻,吴超. 基于改进决策树模型的矿区土地复垦适宜性评价[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(6): 35-43
Wang S D, Liu Y, Wang X C, Wu C. Suitability evaluation of mining-land reclamation based on improved decision tree model[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(6): 35-43 (in Chinese)
- [8] 徐静,冀云卿,马婷婷,温飞,郭长庆. 兰西城市群甘肃段未利用地开发适宜性评价及建议[J]. 环境保护, 2022, 50(23): 58-63
Xu J, Ji Y Q, Ma T T, Wen F, Guo C Q. Suggestions and adaption evaluation of unused land development in Gansu section of Lanzhou-Xining urban agglomeration[J]. *Environmental Protection*, 2022, 50(23): 58-63 (in Chinese)
- [9] 吴艳娟,杨艳昭,杨玲,张超,游珍. 基于“三生空间”的城市国土空间开发建设适宜性评价:以宁波市为例[J]. 资源科学, 2016, 38(11): 2072-2081
Wu Y J, Yang Y Z, Yang L, Zhang C, You Z. Land spatial development and suitability for city construction based on ecological-living-industrial space: Take Ningbo City as an example [J], *Resources Science*, 2016, 38(11): 2072-2081 (in Chinese)
- [10] 刘立文,段永红,李丽丽,徐立帅,张颖,聂文玉. 山西省农村居民点空间分布特征及其适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(1): 100-109
Liu L W, Duan Y H, Li L L, Xu L S, Zhang Y, Nie W Y. Spatial distribution characteristics and suitability evaluation of rural residential areas in Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(1): 100-109 (in Chinese)
- [11] 马利邦,豆浩健,谢作轮,郭晓东. 基于整合驱动因素和适宜性评价的乡村聚落重构模式研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 246-255
Ma L B, Dou H J, Xie Z L, Guo X D. Research on rural settlement reconstruction model based on integration drivers and suitability evaluation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 246-255 (in Chinese)
- [12] 刘琼,杨楠,高萌萌,李小磊,王轶,郅二铨,张旭航. 面向国土空间规划的农业生产适宜性评价:以辽中平原为例[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(2): 183-193

- Liu Q, Yang N, Gao M M, Li X L, Wang Y, Zhi E Q, Zhang X H. Evaluation of agricultural production suitability for territory spatial planning: A case study of Liaozhong Plain [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(2): 183-193 (in Chinese)
- [13] Akpoti K, Kabo-bah A T, Zwart S J. Agricultural land suitability analysis: State-of-the-art and outlooks for integration of climate change analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2019, 173:172-208
- [14] 李娅, 谭秋, 王丽双, 张帆. 县域农业土地利用适宜性评价与优化研究: 以山西省原平市为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(1): 91-99
- Li Y, Tan Q, Wang L S, Zhang F. Research on suitability evaluation and optimization of agricultural land use in county region: A case study of Yuanping City, Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(1): 91-99 (in Chinese)
- [15] Lu X, Zhang Y, Chaoran L, Wu F. Analysis and comprehensive evaluation of sustainable land use in China: Based on sustainable development goals framework[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310(2)
- [16] Zabel F, Putzenlechner B, Mauser W. Global agricultural land resources: A high resolution suitability evaluation and its perspectives until 2100 under climate change conditions[J]. *PLoS One*, 2014, 9(9):e107522
- [17] 王兆林, 杨庆媛, 罗明. 低山丘陵区高标准基本农田建设限制性因子识别与建设方向[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(6): 78-88
- Wang Z L, Yang Q Y, Luo M. The limiting factor identification of well-facilitated farmland construction in hilly areas [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(6): 78-88 (in Chinese)
- [18] Ustaoglu E, Aydmoglu A C. Suitability evaluation of urban construction land in Pendik District of Istanbul, Turkey[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104783
- [19] 刘昭, 高敏华. 灰色关联分析在吐鲁番市农用地适宜性评价中的应用[J]. *安徽农学通报(上半月刊)*, 2009, 15(13): 201-202
- Liu Z, Gao M H. Application of gray connection analysis in suitable evaluation of cultivated land in Turpan [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(13): 201-202 (in Chinese)
- [20] Chen E Y, Tsay R S, Chen R. Constrained factor models for high-dimensional matrix-variate time series [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2020, 115(530): 775-793
- [21] 喻忠磊, 张文新, 梁进社, 庄立. 国土空间开发建设适宜性评价研究进展[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(9): 1107-1122
- Yu Z L, Zhang W X, Liang J S, Zhuang L. Progress in evaluating suitability of spatial development and construction land [J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(9): 1107-1122 (in Chinese)
- [22] Yao M L, Shao D G, Lv C H, An R H, Gu W Q, Zhou C. Evaluation of arable land suitability based on the suitability function: A case study of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 787: 147414
- [23] 毕玮, 党小虎, 马慧, 邓铭江, 李鹏, 曹小曙, 时鹏. “藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 235-243
- Bi W, Dang X H, Ma H, Deng M J, Li P, Cao X S. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of “Food Crop Production Strategy based on Farmland Management” in Northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(7):9 (in Chinese)
- [24] 聂艳, 喻婧, 崔灿. 基于GIS和生态位适宜度模型的园地适宜性评价: 以湖北宜昌市夷陵区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(8): 1000-1005
- Nie Y, Yu J, Cui C. Research on suitability evaluation of garden land in Yiling District based on GIS and Niche-Fitness model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(8): 1000-1005 (in Chinese)
- [25] Morales F, de Vries W. Establishment of land use suitability mapping criteria using Analytic Hierarchy Process (AHP) with practitioners and beneficiaries[J]. *Land*, 2021, 10(3): 235
- [26] 吴靖瑶, 吴克宁, 李晨曦. 中国土地评价研究知识图谱: 基于CiteSpace的计量分析[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1513-1522
- Wu J Y, Wu K N, Li C X. Progresses and perspectives of land evaluation research in China based on CiteSpace quantitative analysis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1513-1522 (in Chinese)
- [27] 宋戈, 刘燕妮, 张文琦, 王思琢. 基于可改良限制因子的耕地质量等别提升潜力研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 261-269
- Song G, Liu Y N, Zhang W Q, Wang S Z. Potential of cultivated land quality grade improving promoted by improvable limiting factors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 261-269 (in Chinese)
- [28] 邵雅静, 员学锋. 基于限制因子分析的耕地质量提升潜力分区[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2442-2449
- Shao Y J, Yun X F. Zoning of cultivated land quality improvement potential based on limiting factor analysis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8): 2442-2449 (in Chinese)
- [29] Cong W W, Li X Y, Pan X B, Liu X P, Lu Q, Wang F. A new scientific framework of dryland ecological quality assessment based on IOAO principle[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108595
- [30] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 王炎强, 温媛媛. 生态系统服务综合关系空间分异及驱动因素: 以石羊河流域为例[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2): 274-284
- Wang Y C, Zhao J, Fu J W, Wang Y Q, Wen Y Y. Recognition of ecosystem services trade-offs and synergistic comprehensive relations: A case study of Shiyang River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(2): 274-284 (in Chinese)
- [31] 鲁晖, 董敬儒, 贺思嘉, 颜耀文. 2000—2017年河西地区山地-绿洲-荒漠系统植被变化趋势与可持续性分析[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(1): 99-108
- Lu H, Dong J R, He S J, Jie Y W. Vegetation change trend and persistence analysis of the mountainoasis-desert system in Hexi region from 2000 to 2017[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2021, 57(1): 99-108 (in Chinese)
- [32] Liu F, Zhang G L, Song X D, Li D C, Zhao Y G, Yang J L, Wu H Y, Yang F. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China[J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114061
- [33] Song X D, Brus D J, Liu F, Li D C, Zhao Y G, Yang J L, Zhang G L. Mapping soil organic carbon content by geographically weighted regression: A case study in the Heihe River Basin, China[J]. *Geoderma*, 2016, 261: 11-22
- [34] Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H, Mills J. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 103(3): 7-27
- [35] 裴子萱, 李强, 刘婷婷, 魏婵娟, 高雨萌. 基于GlobeLand30的城市生态用地时空变化特征: 以北京市为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(24): 10072-10087
- Pei Z X, Li Q, Liu T T, Wei C J, Gao Y M. Spatial and temporal change characteristics of ecological land in Beijing based on GlobeLand30[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(24): 10072-10087 (in Chinese)
- [36] 易晨, 李德成, 张甘霖, 赵玉国, 杨金铃, 刘峰, 宋效东. 土壤厚度的划分标准与案例研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 220-227
- Yi C, Li D C, Zhang G L, Zhao Y G, Yang J L, Liu F, Song X D. Criteria for partition of soil thickness and case studies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 220-227 (in Chinese)
- [37] 董秀茹, 王迪, 刘强. 非耕农用地耕种功能恢复适宜性评价模型构建[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 226-235

- Dong X R, Wang D, Liu Q. Construction of the suitability evaluation model for the cultivated function recovery of non-grain cultivated land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(12): 226-235 (in Chinese)
- [38] 刘凡, 陈桂璋, 吴克宁. 欧洲多年生作物管理经验对我国园地管理的启示[J]. *中国土地*, 2022(4): 40-42
- Liu F, Chen G K, Wu K N. European perennial crop management experience on garden management in China[J]. *China Land*, 2022(4): 40-42 (in Chinese)
- [39] GB/T 28407-2012. 农用地质量分等规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012
- GB/T 28407-2012. Regulation for gradation on agriculture land quality [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012 (in Chinese)
- [40] GB/T 33469-2016. 耕地质量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- GB/T 33469-2016. Cultivated land quality grade[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese)
- [41] TD/T 1071-2022. 园地分等定级规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022
- TD/T 1071-2022. Code of practice for gradation and classification on orchard and perennial plantations[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022 (in Chinese)
- [42] TD/T 1060-2021. 自然资源分等定级通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021
- TD/T 1060-2021. General rules for gradation and classification on natural resources[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (in Chinese)
- [43] 关小克, 张凤荣, 李乐, 郭力娜, 邵战林. 北京市耕地后备资源开发适宜性评价[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 304-310, 431
- Guan X K, Zhang F R, Li L, Guo L N, Shao Z L. Suitability evaluation of reserve resources of cultivated land development in Beijing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12): 304-310, 431 (in Chinese)
- [44] 周璐红, 曹瑞超, 王盼婷. 基于土地资源承载力的农业生产适宜性评价: 以陕西省为例[J]. *生态经济*, 2022, 38(9): 125-130
- Zhou L H, Cao R C, Wang P T. Suitability evaluation of agricultural production based on the carrying capacity of land resources: Taking Shaanxi Province as an example[J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(9): 125-130 (in Chinese)
- [45] 石龙宇, 冯运双, 高莉洁. 长三角县域国土空间开发适宜性评价方法研究: 以长兴县为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6495-6504
- Shi L Y, Feng Y S, Gao L J. The method of territorial spatial development suitability evaluation in the Yangtze River Delta: A case study of Changxing County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(18): 6495-6504 (in Chinese)
- [46] 林培, 孙丹峰. 试论现代土宜科学与地区名优农产品开发[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(1): 33-39
- Lin P, Sun D F. On land suitability science and development of native agro-specialties[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(1): 33-39 (in Chinese)
- [47] 林培. 发展绿色畜禽食品的土地资源环境评价与土地利用规划[J]. *中国动物保健*, 2000, 2(1): 35-36
- Lin P. Evaluation of land resources and environment and land use planning for developing green livestock and poultry food [J]. *China Animal Health*, 2000, 2(1): 35-36 (in Chinese)
- [48] 栾淑丽, 任红艳, 施润和, 崔成. 中国油茶种植适宜性评价及产能提升建议[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(10): 39-47
- Luan S L, Ren H Y, Shi R H, Cui C. Evaluation on the suitability of camellia oleifera planting and suggestions for productivity improvement in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(10): 39-47 (in Chinese)
- [49] 田甜, 唐增, 孙廷艳. 中国不同地区食物消费对土地资源需求的影响研究[J]. *草业学报*, 2017, 26(2): 53-60
- Tian T, Tang Z, Sun T Y. Land requirements for food in different regions of China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(2): 53-60 (in Chinese)
- [50] 张琨玥, 陶明儒, 张金懿, 郝晋珉. 基于食物安全的耕地需求分析与预测[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(11): 14-28
- Zhang K Y, Tao M R, Zhang J Y, Hao J M. Analysis and forecast of cultivated land demand based on food security [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(11): 14-28 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 陈露, 硕士研究生, 现就读于中国农业大学, 本科毕业于山东建筑大学, 硕士期间获得二等学业奖学金。先后参加自然资源部国土卫星遥感应用中心项目: 县级行政区人口空间化数据集研究、农业农村部农业生态与资源保护总站项目: 基于遥感影像的重点外来入侵植物识别技术验证与示范和自然资源部信息中心项目: 耕地与其他农用地转化的适宜性评价研究。



通讯作者简介: 孙强强, 男, 博士, 中国农业大学土地科学与技术学院副教授, 博士生导师。担任中国测绘学会不动产测绘工作委员会委员, *Remote Sensing* 客座编辑等职务。主要从事于土地系统演化的天空地一体定量监测与评估研究, 针对土壤有机质(碳)估算、土地系统表征与互动机制剖析等关键科学技术问题进行了系统深入的研究, 主持国家自然科学基金项目、国家社会科学基金项目、自然资源部项目等研究课题多项, 在 *Remote Sensing of Environment*、*Landscape and Urban Planning* 和 *Land Use Policy* 等期刊发表学术论文 20 余篇。