喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置研究

——以贵州省晴隆县为例

杨庆媛[1,2]　毕国华[1,2]　陈展图[1,2,3]　曾黎[1,2]　杨人豪[1,2]

（1.西南大学地理科学学院，重庆 400715；2.岩溶环境重庆市重点实验室，重庆 400715；3.南宁市社会科学院，南宁 530022）

【摘 要】实行耕地轮作休耕不仅是促进耕地休养生息、加快生态文明建设的重要任务，也是提高农业供给体系质量、实现农业与社会经济可持续发展的重要途径。本文从喀斯特生态脆弱区的人地关系特点出发，围绕休耕的目标导向及约束条件，厘定休耕地空间配置的逻辑内涵，在此基础上以国家休耕试点县——贵州省晴隆县为例，综合运用VSD脆弱性评估框架、灰色预测模型GM（1,1）和GIS空间分析等方法，通过休耕地初判、休耕地修正、休耕地优选三个步骤实现休耕地的分区布局，据此探讨喀斯特生态脆弱区休耕地空间配置的实现路径与技术方法。结果表明：①晴隆县耕地生态系统脆弱性较强，全县70%以上的耕地非常脆弱甚至极度脆弱，急需优化耕地利用方式，促进耕地生态修复。②以粮食安全约束下的耕地保有量作为休耕规模的约束条件，依据耕地生态系统脆弱性由大到小进行筛选，得出晴隆县2015-2020年可休耕耕地规模共计13540.05hm2，占全县耕地面积的37.18%。③根据休耕规模、耕地质量、地形地貌、交通区位、社会经济发展水平等方面的差异，晴隆县休耕地可按“三级五类”进行分区布局，具体布局休耕项目时要因地制宜，制定差异化的休耕模式及休耕组织方式。④休耕地的空间配置是一个“对象”和“规模”双重约束下的休耕地块优选问题，在此过程中，休耕对象诊断是基础，规模预测是约束，休耕项目布局是最终落脚点。

【关键词】休耕；生态脆弱性；粮食安全；空间配置；喀斯特地区；晴隆县

1 引言

随着社会经济发展进入新常态、国际粮食市场趋于稳健、国内粮食综合生产能力逐步提高以及国人食物结构发生变化，中国粮食生产面临库存高企、财政资金压力大等现实问题，农业供给侧结构性改革亟待深化。中国用不到世界1/10的耕地生产了世界1/4的粮食，养活了世界近1/5的人口，但农药化肥的大量施用，迫使耕地长期超负荷运行，农业生态环境不容乐观，农业资源永续利用面临严峻挑战[1-2]。同时，工业化、城镇化背景下大量农村人口向城市迁移，农户生计对耕地生产的依赖性大大降低，耕地闲置、撂荒等现象日趋严重，土地利用方式粗放，耕地管护薄弱，加剧了耕地利用的不可持续性[3]。综合来看，中国耕地利用面临结构调整、功能演进、方式转变等多重转型需求[4-5]，实行耕地轮作休耕的机会窗口已经打开。为此，2016年6月，农业部等10部门联合发布《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》，重点在地下水漏斗区、重金属污染区和生态严重退化地区安排一定面积耕地休耕，以促进耕地休养生息，实现农业与社会经济的可持续发展，标志着中国的休耕正式进入制度化实践阶

收稿日期：2017-09-29;修订日期：2018-08-22
基金项目：国家社会科学基金重大项目(15ZDC032) [Foundation: Major Project of National Social Science Foundation of China, No.15ZDC032]
作者简介：杨庆媛(1966-),女,云南腾冲人,教授,博士生导师,研究方向为土地经济与政策、国土资源与区域发展等。
E-mail:yizyang@swu.edu.cn

段。

休耕是发达国家普遍采取的保护耕地、修复生态、调整种植结构的有效措施，休耕的最初目的多以调控粮食产量为主，而后逐渐演变为一种解决粮食过剩问题、改善农业生态环境的重要手段[6]。欧、美、日等国家自 20 世纪 30 年代起就陆续开始实施耕地休耕，目前已经建立了较为成熟的耕地休耕制度，在休耕制度建设[7-8]、休耕绩效评价[9-10]、耕地退耕与农田保护[11-12]等方面取得了比较丰富的成果。国内休耕研究起步较晚，学术界研究的重点集中在国际休耕经验借鉴[13]、休耕的模式及效应[14-15]以及休耕微观农户的行为[16]等方面。相对于发达国家（地区），中国休耕理论的研究和实践经验均比较薄弱，有不少领域仍处于空白状态，如休耕的区域模式设计、休耕地的诊断与识别、休耕地的时空配置、休耕相关利益主体的利益保护、休耕地的管护与监测评估等[17]。此外，与发达国家休耕制度建立在土地私有制、规模化经营、税收和信用制等基础条件上不同，中国休耕面临利益主体多元化、耕地细碎化、小农经济、农业资源禀赋和生态环境区域差异较大、土地具有较强的社会保障功能等特殊国情，在实际推进中，需要充分考虑区域人地关系、农地制度特征与耕地利用条件等多重因素，因地制宜。

休耕必然会导致粮食产量减少，休耕地的规模不能触及粮食安全底线[18]。在区域（地区）层面，明确“哪些耕地该进行休耕、有多少规模的耕地可以进行休耕”是休耕制度有效落地的前提和保障，二者结合即为休耕地的空间配置问题。目前国内尚无专门针对“休耕地空间配置”的研究，仅有少数学者关注了休耕地的规模与布局问题[19]，其基本思想是借鉴土地整治时空配置、基本农田布局优化等有益思路，探讨规模约束下休耕地块的空间分布，为休耕制度落地提供依据。中国大陆地域辽阔，区域类型多样，自然禀赋、土地利用、经济发展水平差异明显，在区域（地区）层面，应基于各自的问题导向、资源本底和耕地利用条件等，有针对性地设计差异化的休耕实施路径与模式[6]。因此，休耕地的空间配置应充分考虑区域人地关系的特殊性，体现地域特征。本文尝试以生态严重退化的西南石漠化地区为例，解决此区域实施休耕的“地块休耕迫切性诊断”、“可休耕规模测算”以及“休耕地的分区布局”等问题，以期为休耕制度的有效落地提供技术思路及案例参考。

受特殊的地质地貌及与人类活动的交互影响，中国西南喀斯特地区耕地生态系统极其脆弱[20]，制约着该区域的耕地资源永续利用，甚至成为全国社会经济可持续发展的制约因素之一[21]。因此，喀斯特生态脆弱区休耕的主要目的应是缓解生态压力、促进自然生态修复，其核心在于准确识别耕地生态系统的脆弱性[17]。随着全球经济社会受资源环境约束日益明显，人地关系耦合视角下的脆弱性研究不断深入，其演化机理[22]、实证评估[23-24]、治理模式[25-26]等方面的研究已形成相对成熟的体系，特别是作为脆弱性分析与治理基础手段的脆弱性评估，已成为生态系统脆弱性研究的重点领域[22]，且研究方法不断改进，脆弱性评估的模型化和 GIS 等技术的运用日趋成熟广泛[27-28]，能够为识别喀斯特地区耕地生态系统的脆弱性提供很好的参考。因此，本文针对喀斯特地区土地退化的原因及特点以及人地矛盾突出对土地利用的影响，以贵州省晴隆县为案例区域，综合运用脆弱性评估框架（Vulnerability Scoping Diagram,VSD）、灰色预测模型 GM（1,1）和 GIS 空间分析手段，定量明晰研究区休耕地的分区布局，并据此探讨喀斯特生态脆弱区休耕地空间配置的实现路径与方法。

2 理论分析

2.1 休耕概念的界定

休耕是指耕地在可种作物的季节只耕不种或不耕不种，其目的主要是使耕地得到休养生息，以减少水分、养分的消耗，并积蓄雨水，消灭杂草，促进土壤潜在养分的转化，为以后作物生长创造良好的土壤环境和条件，促进耕地资源永续利用[29]。2016 年国家开展轮作休耕试点提出的休耕期限为 3 年，目前，休耕试点尚在推进期，社会各界对“休耕期应设置为多久”尚无统一的认识。事实上，对于生态脆弱区，确定“休耕多久才能使耕地生态系统修复到良好状态”需要结合土地质量监测等手段来实现，并且与休耕实施后的养地措施紧密相关，目前休耕期尚短，无法科学界定。从科学研究的角度出发，研究期过短，不符合休耕实际，研究期过长，则相关变量及假设条件不可控。基于以上考虑，结合数据获取的可行性与可操作性，本文以 2015 年为起点，研究休耕至 2020 年为期 5 年的休耕地空间配置问题，重点为解决“地块休耕迫切性诊断”“可休耕规模测算”以及“休耕地的空间搭配组合”等问题提供理论及技术范式支撑。

2.2 休耕地空间配置的内在逻辑

喀斯特地区脆弱的生态环境与人类活动交互重叠，形成了一种极不稳定的人地关系地域系统，具体表现为自然资源禀赋较差、经济发展水平滞后、土地承载力低、土地利用结构失调、耕地破碎化严重、土地利用强度超出正常阈值、生态系统稳定性差等[30-31]。特殊人地矛盾制约下，喀斯特生态脆弱区耕地多处于边际利用状态[32]。由于边际耕地自然条件较差，加强耕地投入、改善田间管理等手段难以彻底改善耕地利用状态，退耕还林（或称森林式休耕）又由于规模过大可能影响耕地保护红线，因此休耕显得十分必要。生态脆弱地区耕地可持续利用的基本途径是将边际耕地退下来，更有效率地利用质量好的耕地[33]。但目前中国人地关系紧张的基本格局没有改变，粮食安全仍是未来社会经济发展和土地利用的重要约束[34]，这决定了不是所有耕地都能同时休耕。在区域（地区）层面，受粮食自给率的影响，必须保留足够数量的耕地继续耕作以维持人口及社会经济发展需要，因此，休耕制度的落地实际上是一种规模约束下的休耕“对象”空间选择问题，也即休耕地的空间配置。需要说明的是，理论上，在国际粮食市场稳定及国内粮食库存盈余的情况下，区域（地区）的粮食安全可以通过粮食调配来保障，但也存在推高粮食价格、造成粮食市场波动等不确定性。同时，粮食调配等手段是否能解决、如何解决区域（地区）层面的粮食安全问题，需要结合各地粮食生产能力、国内外粮食市场等具体数据进行详实论证。此外，从口粮安全角度考虑，短期内区域（地区）粮食自给需求不会发生根本转变。综合以上因素，本文仅考虑粮食自给情境下的区域粮食安全问题。

2.3 休耕地空间配置的技术流程

休耕地的空间配置包含 3 个方面的内容[17]：①休耕对象的诊断，其目的在于对耕地地块休耕的迫切性及其空间分布做出基本判断，实现休耕地的“定位”。在喀斯特生态脆弱区，其核心是以缓解生态压力、促进生态系统修复为主要目的，识别耕地生态系统的脆弱性。②可休耕规模的预测，其目的在于确定休耕期内有多少耕地可以进行休耕，实现休耕地的“定量”。③休耕地的分区布局，其目的在于结合研究区耕地利用限制因素、地貌格局、经济发展水平、交通区位等因素对休耕地进行分区布局，实现休耕的“最终落地”。

据此，喀斯特生态脆弱区休耕地的空间配置可分为 3 个步骤：①依据生态脆弱性初选拟休耕“对象”区域，即提取影响喀斯特生态脆弱区耕地生态系统脆弱性的主要因子，综合诊断耕地生态系统的脆弱性，识别耕地休耕迫切性的空间分布；②对初选结果进行修正，即以区域内粮食安全保障为约束，利用耕地保有量预测模型推算可休耕耕地规模，并按迫切性由大到小筛选可休耕耕地；③优选休耕区域，即结合区域地貌格局、经济发展、交通区位等确定休耕地的分区布局。在此过程中，休耕对象诊断是基础，休耕规模测算是约束条件，休耕地分区布局是最终落脚点。喀斯特生态脆弱区休耕地空间配置的技术流程如图 1 所示。

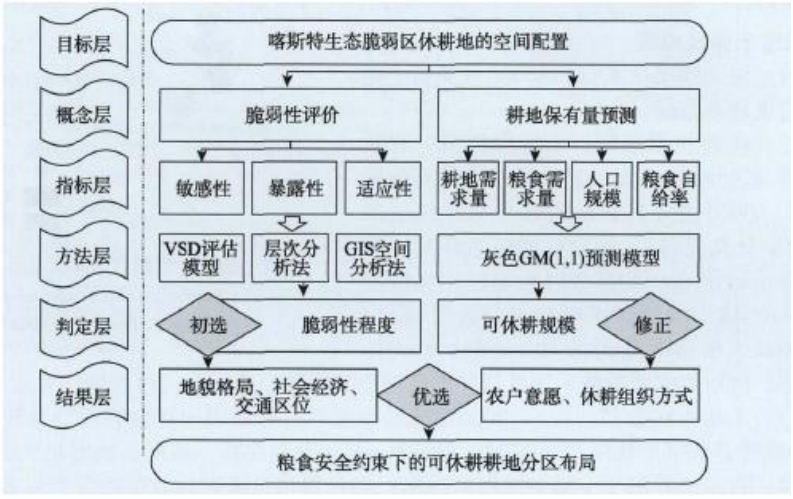

图 1　喀斯特生态脆弱区休耕地空间配置的技术流程

Fig. 1　Framework of space allocation of fallow land in ecologically fragile karst areas

3 研究区概况与数据来源

3.1 研究区概况

晴隆县是贵州省黔西南州下辖县，地处贵州省西南部、黔西南布依族苗族自治州东北角，辖区范围介于 105° 01′ E~105° 25′ E、25° 33′ N~26° 11′ N 之间，属云贵高原中段高原峡谷区，具有“山高坡陡谷深”的特点。这里属于高原亚热带季风气候区，气候温和湿润，充沛的降水和可溶性岩石交互作用，为土地石漠化的发生提供了侵蚀动力和溶蚀条件。20 世纪 80 年代末以来，在脆弱的自然环境及人类活动的双重影响下，晴隆县境内石漠化程度不断加剧，现石漠化面积已达到 8.85×104hm^2，占全县土地面积的 40.56%，属于石漠化典型地区。晴隆县社会经济发展水平相对滞后，是国家级贫困县。2017 年，全县实现 GDP75.44 亿元，在贵州省 88 个县区市中排名第 64 位；全县城镇常住居民人均可支配收入、农村常住居民人均可支配收入分别为 26222 元和 7583 元，与全国 33834 元和 11969 元的平均水平差距较大。

晴隆县人地关系紧张，截止 2017 年末，全县常住总人口 24.75 万人，人口密度 205.52 人/km^2，人均耕地面积不足 0.03hm^2。全县 36416.77hm^{2}耕地中，25° 以上陡坡耕地面积达 25889.20hm^2，占耕地总面积的 71.09%，耕地利用条件极差，耕地后备资源严重不足。长期以来，受经济发展水平、技术要素投入、耕地利用条件等制约，晴隆县农业生产方式仍以传统农耕为主，耕地利用强度高，本就贫瘠的耕地承受着越来越多的化肥、农药等投入，可持续生产能力面临严重威胁，土地利用方式亟待转型。正是基于上述特殊的社会经济发展情况及人地关系特点，晴隆县于 2016 年被列为贵州省 5 个休耕试点县之一（图 2）。本文选择晴隆县为研究区，能够真实反映喀斯特生态脆弱区的自然环境、耕地利用、社会经济发展等特征以及休耕的必要性与迫切性，具有很好的代表性与典型性。

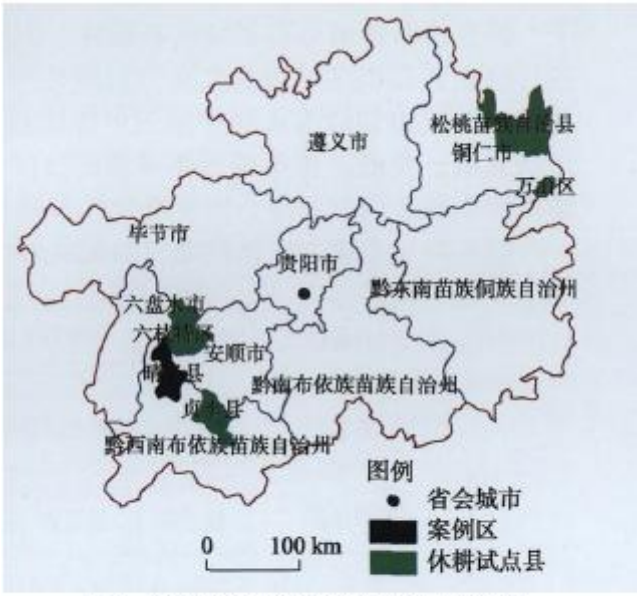

图2 2016年贵州省休耕试点县分布图

Fig. 2 Spatial distribution of pilot counties of fallow land in Guizhou Province in 2016

3.2 数据来源及处理

（1）地类数据：来自 1∶10000 晴隆县土地利用变更调查数据（2015）。

（2）耕地利用数据：土壤有机质、有效土层厚度、土壤 pH 值、灌溉排水条件等数据来自 1∶10000 晴隆县耕地质量分等定

级成果（2014 年补充完善）；距农村居民点距离、距城市建成区距离、距县级以上道路距离数据利用 ArcGIS10.2 缓冲区分析工具计算得出；耕地田块大小运用 ArcGIS10.2 地类属性表计算得出，耕地集中度指数采用景观分离度指数的倒数表示，并以村为单位求取[35]。

（3）土地本底数据：从 1∶10000 晴隆县地质岩性分布图中提取岩性分布数据；从 1∶10000 晴隆县数字高程模型（DEM，5m×5m）中获取高程、坡度、地形起伏度数据。

（4）石漠化等级及土壤侵蚀风险数据：来自贵州省发展和改革委员会和贵州师范大学南方喀斯特研究院的《晴隆县石漠化现状分布图》《晴隆县土壤侵蚀分布图》矢量数据，从中提取石漠化等级及土壤侵蚀风险的空间分布数据。

（5）社会经济数据：主要包括复种指数、粮食产出、化肥施用量、农药施用量、农膜施用量以及人口等数据，来自《晴隆县统计年鉴（2013-2016）》和《晴隆县农经统计报表（2016）》。

（6）调研数据：农户休耕意愿、对休耕及其补偿的满意度等来源于对休耕试点涉及村组的入户访谈：课题组于 2016 年 5 月对晴隆县休耕试点村进行实地调研，通过参与式农户问卷调查，采用小型座谈会及半结构访谈的形式访问村干部与农户，获取相关数据及信息。问卷内容主要涉及农户个人及家庭情况、家庭收支及财产情况、耕地利用情况、农业投入及支出情况以及对休耕的认知及响应 5 方面，共发放问卷 500 份，收回有效问卷 418 份。试点区耕地利用的实际情况、地貌格局、交通区位等情况来源于课题组的实地踏勘，并参考了《晴隆县土地利用总体规划（2006-2020 年）》和《晴隆县“十三五”规划纲要》等规划资料。

（7）数据库建设：通过 ArcGIS10.2 建立空间数据库，统一各专题图件的空间投影坐标系（Gauss_Kruger,Xian_1980_3_Degree_GK_Zone_35）以便进行叠加分析，并整合社会经济数据，最终形成综合属性数据库。

4 研究方法

4.1 喀斯特地区耕地生态系统脆弱性评价方法

4.1.1 评价模型的构建目前学术界对生态系统脆弱性的认知各有不同，但普遍认为脆弱性的强弱取决于系统的暴露程度、敏感程度和适应能力[36]。暴露程度是生态系统遭遇灾害或危险的程度，反映地区在灾害性事件中的潜在损失，主要取决于地区人类活动的强度和灾害发生的频率；敏感程度反映系统对外部干扰的反应速度，主要取决于生态系统自然本底条件的稳定性；适应能力是生态系统对灾害事件的响应速度、应对能力和恢复能力，主要取决于地区的经济发展水平和管理水平[37]。通常敏感程度和暴露程度与系统的脆弱性成正向关系，适应能力与脆弱性成反向关系。围绕暴露程度、敏感程度和适应能力开展系统脆弱性评价得到学界广泛的认可，Polsky 等[38]在此基础上进一步提出了 VSD 脆弱性评估框架，将生态系统脆弱性分解为敏感性、暴露性和适应性 3 个维度，用“目标层—准则层—指标层”逐级递进的方式组织、评价数据，可以很好地揭示自然要素与人文要素的双重影响，得到广泛应用。本文参考 Polsky 的 VSD 脆弱性评估框架对耕地生态系统脆弱性进行定量评价，作为休耕迫切性诊断的依据：

$$Z = E + S - A \qquad (1)$$

式中：Z 表示耕地生态系统脆弱性综合得分；E 代表暴露性（Exposure）；S 代表敏感性（Sensitivity）；A 代表适应性（Adaptivecapacity）。Z 值越大表示耕地生态系统脆弱性越强（即越脆弱），休耕的迫切程度也越高，反之耕地生态系统脆弱性越小，休耕的迫切程度也越低。

4.1.2 评价指标的选取 VSD 脆弱性评估框架的关键在于诊断影响系统敏感性、暴露性和适应性的各类因子所处的状态。对于耕地生态系统而言，气候条件、耕地利用本底条件（如地质地貌、土壤等）、人类活动、社会经济环境、农业基础设施建设水平等因子均会对系统的敏感性、暴露性和适应性产生较大影响，从而影响系统整体的脆弱性。在喀斯特地区，还必须考虑土壤侵蚀和石漠化等特殊区域性因子的干扰[39]。本文基于喀斯特地区耕地生态系统脆弱性的影响因子，从 VSD 模型敏感性、暴露性和适应性的理论内涵出发，充分考虑数据的可获取性与可操作性，构建喀斯特生态脆弱区耕地生态系统脆弱性评价指标体系。

敏感性：反映耕地生态系统在外界干扰下发生变化的难易程度，在喀斯特石漠化地区，主要表现为抵抗水土流失的能力、石漠化程度以及耕地利用状态。耕地地块抵抗水土流失的能力可由所在位置的基岩岩性、坡度、高程、地形起伏度以及土壤侵蚀风险等指标反映，石漠化程度可由石漠化等级指标反映，耕地利用状态可由土壤有机质含量、土壤 pH 值和有效土层厚度等指标反映。此外，降水也是影响石漠化敏感性的重要因素，但县域尺度内降水差异性过小，根据显著性和差异性原则，该指标不纳入本次评价指标体系。

暴露性：反映耕地生态系统暴露在人类和外界环境下的程度、与外界发生交互作用的频率等，最直接的表现为人类从事耕地利用活动的强度，可由人口密度、种植作物类型、复种指数和单位产出农资施用量等指标反映。同时，对晴隆县的实地调研发现，一些非农活动如农民日常生活、城镇建设、交通运输等会对周边耕地利用产生较大影响，如距离居民点越近的耕地往往破碎度越高，位于城市、交通干线附近的耕地产出能力明显低于位于农村内部的耕地。因此，本文选择距农村居民点距离、距城市建成区距离、距县级以上道路距离 3 项指标来反应人类非农活动对耕地利用的间接影响程度。此外，植被覆盖度是反映生态暴露性的重要指标，由于单一地块的植被覆盖比较均一（往往表现为种植作物的季节变化），因此以种植作物类型替代。自然灾害频发是制约喀斯特生态脆弱地区土地利用的重要因素，同时自然灾害发生频率、程度也是反映暴露性的重要指标，但目前自然灾害发生指标以县域为统计单元，不能满足评价指标选取的差异性原则，故不纳入本次评价指标体系。

适应性：反映耕地生态系统应对外界变化和风险时的调整恢复能力和响应速度。耕地利用属于人类主观能动性活动，其适应性取决于两方面：①耕地生态系统的自我修复能力；②耕地利用者应对风险变化的能力、管理水平和能够为此付出的成本大小。一般而言，耕地田块面积越大、分布越集中，生物多样性维持得越好，因而其自我修复能力相对越强；同时，耕地产出效益越好、基础设施越完善的地区（耕地利用者）保护和修复耕地生态系统的意愿和能力越强。因此，耕地生态系统适应性层面选取田块大小、耕地集中度指数、单位面积粮食产出、农民人均纯收入、灌溉设施水平、排水设施水平 6 项指标。

层次分析法适用于处理多层次和难于完全用定量方法描述的复杂性评价问题。耕地生态系统脆弱性内涵丰富、因素众多，评价指标定性与定量交叉，统计数据和非统计数据重叠，且目前休耕及耕地生态系统评价尚处于探索阶段，地方实践经验及专家意见指导意义较大。为此，本文结合实地调研以及地理学、土地管理学、农学、土壤学等方面的基本原理，采用层次分析法确定指标权重，通过构造判断矩阵并求最大特征根和特征向量，进行层次总排序并进行一致性检验（一致性比率为 0.036，具有较好的一致性）。同时参考相关研究[40-41]，结合晴隆县各评价指标的观测值分布情况对评价指标进行分级处理与标准化（表 1）。

4.1.3 指标数据标准化由于评价指标存在定性与定量的差异，而且定量指标存在量纲上的差异，在进行综合评价之前需要确定定性指标及区间性指标的分级标准，并对统计型指标数据进行无量纲化处理。坡度、高程参考中国地形地貌划分标准，结合研究区实际坡度及高程分布进行量化；基岩岩性、地形起伏度参考石漠化敏感性评价相关研究[42]进行量化；土壤侵蚀危险性参考水利部《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007），并结合相关研究[43]进行量化。土壤有机质含量、土壤 pH 值、有效土层厚度参考《县级农用地分等定级规程》及晴隆县耕地质量分等定级成果进行量化。种植作物类型、复种指数根据晴隆县农作物播种的实际情况进行量化。距农村居民点距离、距城镇建成区距离、距县级以上道路距离依据各要素对耕地影响的辐射范围，并结合晴隆县耕地利用实际情况进行量化。田块大小、耕地集中度指数根据观测值的数据分布特征划分为 5 级进行量化。具体量化标准如表 2 所示。单位面积粮食产出、单位产出农资施用量、农民人均纯收入、人口密度等指标数据以村为单位进行统计，采用极值标准化方法进行无量纲化处理，标准化到[0,1]区间。

4.1.4 评价单元的确定本文以晴隆县土地利用变更调查数据（2015）中提取的耕地斑块为最小评价单元，部分社会经济数据的统计是以村为单位，在评价过程中将这些指标的均值赋予每个行政村的所有图斑。

4.2 可休耕规模测算模型

休耕规模是指一定时期内，区域可进行休耕耕地的最大数量。在粮食安全约束下，休耕规模等于基期年现状耕地规模减去目标年耕地保有量。本文以 2015 年为基期年，以 2020 年为目标年，预测研究区 2015-2020 年间的可休耕规模。休耕规模预测模型如下：

$$Q = Q_c - Q_t \qquad (2)$$

式中：Q 表示休耕理论规模；Qc 表示基期年研究区现状耕地规模；Qt 表示研究区目标年粮食安全约束下的耕地保有量。

表 1　耕地生态系统脆弱性评价指标体系

Tab. 1　The evaluation index system of the ecological vulnerability of cultivated land

目标层	准则层	指标层	编号	权重
喀斯特石漠化地区耕地生态压力脆弱性	敏感性(0.5001)	基岩岩性	X1	0.0754
		土壤侵蚀危险性	X2	0.0814
		坡度	X3	0.0554
		高程	X4	0.0265
		地形起伏度	X5	0.0698
		石漠化等级	X6	0.0836
		土壤有机质含量	X7	0.0360
		土壤pH 值	X8	0.0360
		有效土层厚度	X9	0.0360
	暴露性(0.2498)	人口密度	X10	0.0223
		种植作物类型	X11	0.0183
		复种指数	X12	0.0544
		单位产出农资施用量	X13	0.0544
		距农村居民点距离	X14	0.0404
		距城镇建成区距离	X15	0.0300
		距县级以上道路距离	X16	0.0300
	适应性(0.2501)	田块大小	X17	0.0399
		耕地集中度指数	X18	0.0633
		单位面积粮食产出	X19	0.0224
		农民人均纯收入	X20	0.0447
		灌溉设施覆盖率	X21	0.0399
		排水设施覆盖率	X22	0.0399

目前，粮食安全下耕地保有量预测研究中应用最多且较成熟的是耕地保有量预测模型，参考相关研究[44,46]，本文构建的耕地

保有量预测模型为：

$$S=\frac{G\times P\times a}{d\times q\times k\times \beta} \qquad (3)$$

式中：S 为目标年耕地需求量；G 为目标年人均粮食需求量；P 为目标年人口预测规模，α 为目标年的粮食自给率；d 为基期年粮食单位面积产量；q 为基期年粮食播种面积占农作物播种面积比例；k 为基期年复种指数；β 为粮食产量增长率。各项参数在运用时参照不同情景确定。

5 结果分析

5.1 休耕地初判：地块休耕迫切性诊断

耕地生态系统脆弱性评价的目的在于区分耕地地块进行休耕的迫切度（优先度）。理论上，受特殊人地关系的制约，喀斯特生态脆弱区所有耕地均宜进行休耕以恢复地力、修复生态环境，耕地生态系统并没有绝对脆弱或绝对不脆弱的概念。因此，本文讨论的耕地生态系统脆弱性是一种研究范围内各耕地地块之间的相对概念。参考土地评价一般原理，采用等间距法，根据 VSD 模型计算耕地生态系统脆弱性综合得分 Z，将研究区耕地生态系统脆弱性综合分值大小划分为一般脆弱（0≤Z＜0.25）、比较脆弱（0.25≤Z＜0.50）、非常脆弱（0.50≤Z＜0.75）、极度脆弱（0.75≤Z≤1）4 个等级。

表2　耕地生态系统脆弱性评价指标分级标准

Tab . 2　The classification standard of evaluation index for the ecological vulnerability of cultivated land

指标层	指标量化标准				
	0	0.25	0.5	0.75	1
基岩岩性	石灰岩	白云岩	不纯灰岩	次不纯灰岩	埋藏性可溶性岩、非可溶性岩、无碳酸盐岩
土壤侵蚀危险性	毁坏型	极险型	危险型	轻险型	无险型
坡度(°)	> 25°	15°~25°	10°~15°	5°~10°	0°~5°
高程(m)	> 1500	1000~1500	500~1000	200~500	0~200
地形起伏度	> 300	100~300	50~100	20~50	0~20
石漠化等级	强度石漠化及以上	中度石漠化	轻度石漠化	潜在石漠化	无石漠化
土壤有机质含量(g/kg)	< 1	1~2	2~3	3~4	> 4
土壤pH 值	< 4.0, 9.0~10.0	4.5~5.0	5.0~5.5, 8.5~9.0	5.5~6.5, 7.5~8.0	6.5~7.5
有效土层厚度(cm)	< 15	15~30	30~60	60~100	>100
种植作物类型		小麦—玉米		水稻—油菜	
复种指数		2		1	
距农村居民点距离(m)	< 20	20~40	40~60	60~80	> 100
距城镇建成区距离(m)	< 100	100~200	200~300	300~500	> 500
距县级以上道路距离(m)	< 50	50~100	100~150	150~200	> 200
田块大小(hm^2)	< 1	1~10	10~20	20~40	> 40
耕地集中度指数	< 1	1~2	2~3	3~4	> 4
灌溉设施水平	无灌溉条件	有部分灌溉条件	一般满足	基本满足	充分满足
排水设施水平	无排水条件	有部分排水条件	排水条件一般	排水条件基本健全	有健全排水沟

针对晴隆县 42085 个耕地图斑（地块）的评价结果（表 3）显示，晴隆县耕地利用情况不容乐观，无论从图斑个数还是耕地面积来看，绝大部分耕地生态系统的脆弱性较高，75%以上的耕地生态系统非常脆弱甚至极度脆弱，一般脆弱的耕地不足 0.5%，整体的休耕迫切性较强（表 4）。通过比对耕地利用条件指标观测值数据可以发现，极度脆弱和非常脆弱的耕地中，76.34%耕地坡度大于 25°（陡坡耕地），85.79%耕地地形起伏度大于 100，72.33%耕地极易发生土壤侵蚀风险，87.36%耕地石漠化等级已处于中度以上水平。可见，脆弱的资源环境本底和恶劣的耕地利用条件奠定了晴隆县耕地生态系统脆弱性的基础。

表 3　晴隆县耕地生态系统脆弱性基本情况

Tab. 3　The basic situation of the ecological vulnerability of cultivated land in Qinglong County

耕地生态系统脆弱性	图斑个数	图斑个数占比(%)	耕地面积(hm²)	面积占比(%)
极度脆弱	538	1.28	1236.99	3.40
非常脆弱	30496	72.46	26766.75	73.50
比较脆弱	10963	26.05	8236.75	22.62
一般脆弱	88	0.21	176.28	0.48
总计	42085	–	36416.77	–

表 4　耕地保有量计算相关指标预测结果

Tab. 4　The prediction results of indices related to cultivated land quantity

预测指标	基期年	目标年	数据来源
人口规模预测(万人)	24.85	25.18	晴隆县统计局数据
人均粮食需求量预测(kg)	—	479	2014 年世界银行发布的《中国经济简报》
粮食自给率预测(%)	—	70	2015 年我国粮食市场及政策分析
粮食产量增长率预测(%)	3.81	5	晴隆县统计局数据

从空间分布（图 3）来看，这些利用条件较差的耕地主要分布在莲城街道、东观街道、中营镇、碧痕镇等乡镇（街道）及其周边，这里恰恰是晴隆县城镇建成区的分布区域，其中莲城街道、东观街道又有两条国道过境。通过与缓冲区分析的结果对照可以发现，极度脆弱耕地中 90%以上分布于城镇建成区周边 500m 范围内、80%以上分布于县级以上道路周边 200m 范围内。进一步将极度脆弱的耕地图斑与晴隆县耕地质量分等定级成果进行叠加分析，本文发现这些耕地普遍存在有机质含量低、有效土层厚度薄、土壤 pH 值失常等问题，耕地质量较差。同时，这些耕地图斑比较破碎，集中程度低，田块规模普遍低于 10hm2。

可见，人口的相对集中、频繁的社会经济活动、城镇及交通基础设施的建设等不仅破坏了耕地利用形态、造成耕地质量的严重下降，更降低了耕地生态系统的抗干扰能力与自我修复能力，对耕地生态系统的脆弱性产生了非常明显的负向作用。

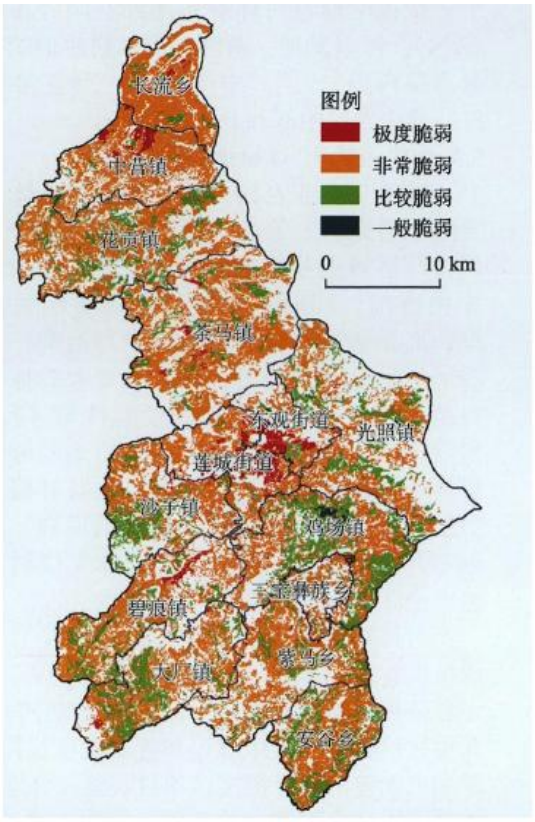

图3　晴隆县耕地生态系统脆弱性空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of the ecological vulnerability of cultivated land in Qinglong County

5.2 休耕地修正：休耕规模的确定

灰色预测是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法，对基础数据信息量较少情境下的预测具有很好的适用性。耕地保有量预测涉及的指标信息如人口数量、粮食产量等均具有较强的不确定性，同时由于历史统计数据有限，利用灰色 GM（1,1）预测模型等方法，预估目标年（2020 年）晴隆县的人口、人均粮食需求量、粮食产量增长率（表 4）。假设研究期内晴隆县农作物种植结构不变，仍以水稻和小麦为主，同时假设粮作比、复种指数保持不变①，将表 4 中数据代入式（3），计算可得晴隆县 2020 年的耕地保有量为 22876.67hm^2。

本文以耕地生态系统脆弱性诊断为基础，以可休耕最大规模为约束，对晴隆县耕地地块进行逆序筛选。即按照综合诊断分值由大到小的顺序，对耕地地块进行面积累加，直到累加面积达到或略小于可休耕最大规模。基于 ArcGIS10.2 空间数据属性表对耕地地块进行筛选，得出 2015-2020 年间晴隆县可休耕耕地规模共 13540.05hm^2，占全县耕地面积的 37.18%，共涉及耕地图斑（地块）14219 个。依据晴隆县可休耕耕地的空间分布情况（图 4），可以发现，晴隆县可休耕耕地的空间分布呈现出“北”“中”“南”三大主要集聚区，其中尤以中部和北部最为集中。

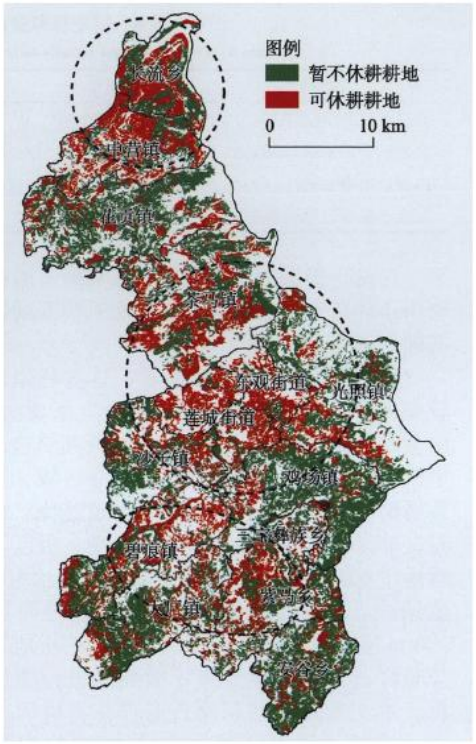

图4　晴隆县可休耕耕地的空间分布

Fig 4　Spatial distribution of fallow land in Qinglong County

5.3 休耕地优选：休耕地的分区布局

耕地与农业农村发展息息相关，休耕涉及的因素众多、影响广泛，休耕地的分区布局需与区域地貌格局、经济发展、交通区位等相协调。同时，休耕并非对耕地置之不理，而是通过对休耕地的管护与治理，提升耕地可持续利用能力，因此也要考虑休耕项目组织推进与后期管护的便利性与可行性。

实践证明，以村为单位进行休耕地的分区布局便于协调沟通、组织推进、收益补偿、维护监管等，同时可以与土地整治规划、村规划等起到很好的衔接。为此，本文以村为单位讨论休耕地的分区布局问题。

为提高休耕实施的整体效益，并方便休耕组织管理，休耕地的分区布局应考虑以下原则：①村域可休耕规模应作为分区布局的主要依据。结合晴隆县可休耕耕地的空间分布情况可知，可休耕耕地规模较大的行政村其可休耕耕地的集中程度和连片程度往往较好，便于休耕项目红线的圈定，同时也有利于和土地整治项目衔接，项目实施综合效益较好，应作为重点项目进行布局。②可休耕耕地占本村全部耕地的比例（简称为休耕比）应作为休耕项目布局的辅助依据。可休耕耕地占本村全部耕地比例较大的行政村，其休耕项目涉及的农户较多，耕地地块产权界定与面积量算过程更加繁琐，牵涉的利益问题更加复杂，农户利益协调工作更加困难，宜作为重点项目优先处理。③分区布局后具体休耕项目的实施应结合所在地区的耕地利用特点、地形地貌、社会经济发展水平以及交通区位等，选择差异化的休耕模式。基于上述原则，制定晴隆县休耕地分区布局标准（表 5），据此将晴隆县以村为单位的休耕分区布局划分为“三级五类”，并运用 ArcGIS10.2 进行空间表达（图 5）。

表5　晴隆县休耕地分区布局标准

Tab.5　The distribution standard of fallow land for different parts of Qinglong County

级别	类型	划分依据	特征
I级区	重点村	$Q \geqslant 200$，$\alpha \geqslant 50\%$	可休耕规模较大，休耕迫切性很强，且耕地集中连片
	一般村	$Q \geqslant 200$，$\alpha < 50\%$或$100 \leqslant Q < 200$，$\alpha \geqslant 50\%$	
II级区	重点村	$100 \leqslant Q < 200$，$\alpha < 50\%$或$70 \leqslant Q < 100$，$\alpha \geqslant 50\%$	可休耕规模居中，休耕迫切性较强，耕地分布相对集中，但连片程度不高
	一般村	$70 \leqslant Q < 100$，$\alpha < 50\%$或$Q < 70$，$\alpha \geqslant 50\%$	
III级区	一般村	$Q < 70$，$\alpha < 50\%$	可休耕规模较小，休耕迫切性较低，且地块破碎程度较高，其休耕整体推进难度稍大，可作为国家“自上而下”部署的休耕规模不能完成时的补充

注：Q为可休耕规模，α为休耕比。

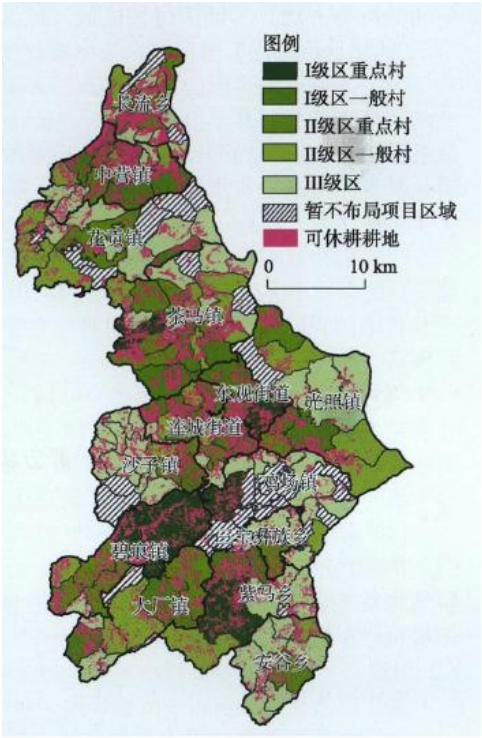

图5　晴隆县休耕区域分布图

Fig.5　Spatial variation of fallow land in Qinglong County

I级区：主要分布在碧痕镇、茶马镇、东观街道、鸡场镇、紫马乡等乡镇（街道），共涉及34个行政村，休耕规模6187.02hm^2，占全县休耕规模的45.69%。按可休耕规模及比例差异又可进一步划分为重点村和一般村，其中重点村休耕规模共计3432.75hm^2，一般村休耕规模共计 2754.27hm^2。这些区域分布于城市建成区周边和主要交通干线周边，地形起伏相对较小，农村社会经济发展水平整体较高，农户兼业行为普遍，非农收入可观且在收入构成中占比较大，农户休耕意愿非常强烈，能够为休耕项目落地实施提供很好的支撑，但城乡要素互通频繁、人地相互作用强烈，耕地利用强度和压力较大，耕地质量极其恶劣。该区域休耕应重点与“养地”结合，在休耕的同时，通过土壤养分管理措施改善和保持良好的土地状况，改良土壤物理性质，并建立良好的土壤养分环境，改善耕地土壤质量状况。

II级区：主要分布在安谷乡、大厂镇、光照镇、花贡镇、莲城街道、沙子镇、中营镇等乡镇（街道），共涉及57个行政村，

休耕规模 4944.58hm^2，占全县休耕规模的 36.52%。按可休耕规模及比例差异又可进一步划分为重点村和一般村，其中重点村休耕规模共计 2559.42hm^2，一般村休耕规模共计 2385.16hm^2。这些区域分布比较广泛，耕地利用强度较城乡结合部略低，耕地分布相对集中但连片程度不高，社会经济发展对农业的依赖性较强，农产品种植收入在农户收入中占比较大。虽然在现有休耕补偿标准下农户休耕意愿较强，但休耕后农户的生计问题仍需得到重视。该区域的休耕应重点与“农村土地整治”结合，在休耕期间实施田块归并平整、生产道路完善、坡改梯等工程，依靠工程技术手段提升地力、改善耕地利用条件，同时降低水土流失发生风险。同时，为了促进农业转型与乡村振兴，可通过中低产田改良、高标准基本农田建设等手段，促进耕地适度规模经营，充分考虑休耕地后期进行农业园区建设、发展现代农业的可能性，促进耕地价值显化。

III 级区：主要分布在安谷乡、碧痕镇、茶马镇、大厂镇、光照镇、花贡镇等乡镇（街道），共涉及 73 个行政村，休耕规模 2408.45hm^2，占全县休耕规模的 17.79%。由于其休耕规模和休耕比均较小，因此，不再细分重点村和一般村。这些区域主要分布在晴隆县城外围，耕地利用方式粗放单一、分散化破碎化严重、利用强度一般，但这些区域海拔较高、地形崎岖、森林覆盖率较高，具有重要的生态涵养功能。该区域休耕应特别注意与“生态保护”结合。一方面，协同生态红线划定、耕地保护红线划定等工作落实休耕“保护区”，实行休耕的分区管护；另一方面，结合石漠化治理措施，做好生态移民工作，落实生态退耕，提高森林覆盖率，降低水土流失发生率，保护生态环境。

6 结论与讨论

6.1 结论

本文立足喀斯特生态脆弱区人地关系的特殊性，从休耕地空间配置的内在逻辑出发，以贵州省晴隆县为研究区，综合运用 VSD 脆弱性评估模型、灰色关联模型以及 GIS 空间分析等方法，实证探讨该区域（地区）实施休耕的“休耕对象诊断”“休耕规模约束”“休耕分区布局”等问题，为休耕制度的有效落地提供参考。得出的主要结论有：

（1）休耕对象诊断的结果显示，晴隆县耕地生态系统脆弱性整体较强，全县 70%以上的耕地非常脆弱甚至极度脆弱，急需优化耕地利用方式，促进耕地生态修复。导致晴隆县耕地生态系统脆弱性强的主要原因在于：地形复杂，坡耕地比重大，水土流失和石漠化严重，灌溉、排水设施难以配套，耕地利用条件极差，同时传统的农业生产方式加大了耕地压力，耕地质量、土壤肥力严重下降。

（2）以粮食安全约束下的耕地保有量作为休耕规模的约束条件，依据耕地生态系统脆弱性由大到小进行筛选，得出晴隆县 2015-2020 年可休耕耕地规模共计 13539.44hm2，占全县耕地面积的 37.18%。可休耕耕地在空间分布上呈现出“北”、“中”、“南”三大主要集聚区。

（3）晴隆县休耕地的空间布局可划分为“三级五类”，即 I 级重点休耕区域、I 级一般休耕区域、II 级重点休耕区域、II 级一般休耕区域、III 级休耕区域，未来休耕项目落地可据此依次开展。不同类型区的耕地利用存在休耕规模、地形地貌、社会经济发展水平等方面的差异，休耕项目落地要因地制宜，制定差异化的休耕模式及休耕组织方式。

（4）休耕地的空间配置是一个“对象”和“规模”双重约束下的地块休耕优选问题。休耕地的空间配置涉及土地评价、指标预测等多方面的综合过程，最终目的是使休耕地块落地，指导休耕实践。在这个过程中，休耕对象诊断是基础，规模预测是约束，休耕项目布局是最终落脚点。

6.2 讨论

基于以上研究，有以下问题需进一步讨论：

（1）本文研究县域层面休耕地的空间配置问题，最终将休耕地落实到地块，目的是为休耕制度的落地提供理论指导和技术借鉴，属于中观层面的实证研究。与现有关于休耕规模和空间布局的研究不同，本文构建了一个相对完整的休耕地时空配置研究框架，实现了休耕地的“定位”与“定量”，并且在这个过程中，以缓解人地关系矛盾为逻辑出发点，突出了耕地利用的地域特征和休耕的区域差异。本文选择出的Ⅰ级休耕区域与研究区休耕试点的实际实施区域具有很好的吻合性，说明“‘对象’和‘规模’双重约束下的休耕地空间配置”这一逻辑流程和技术方法比较符合喀斯特生态脆弱区休耕落地的实际需要。区域（地区）层面的休耕地空间配置问题应以解决耕地利用限制问题为基本导向，以促进人地关系地域系统协调可持续发展为根本目的，如在生态严重退化区重点考虑耕地生态系统的脆弱性和退化程度、在地下水漏斗区重点考虑地下水资源开采的承载能力与地下水流失的程度、在重金属污染区重点考虑土壤污染程度等。

（2）由于国内休耕实践尚不成熟，同时受研究尺度及数据可获取性的限制，本文在进行研究时做了一些基本假设：①将休耕期界定为 5 年；②假设研究期内区域粮食自给格局不会发生较大变化，即短期不会发生大规模粮食调配现象，以此为基础讨论耕地保有量约束下的可休耕规模。未来随着休耕范围和规模的扩大，有必要拓展研究期和研究范围，同时要综合考虑休耕规模的外部因素，如全国层面需考虑国际粮食市场供需平衡的影响，区域（地区）层面需在全国粮食供需格局下考虑粮食调配的影响，县域层面还应进一步考虑口粮安全。此外，农户生计是休耕制度实施必须考虑的重要问题，农户休耕意愿应作为休耕地空间配置需考虑的重点因素。笔者通过调研发现，国家在晴隆县休耕试点的补助标准及方式能够基本满足农户需求，因此整个晴隆县农户休耕意愿均比较强烈，所以本文暂时未考虑农户意愿对休耕地空间配置的影响。未来在其他地区的休耕实践中，有必要结合农户意愿、生计转型、社会经济发展水平等探索差异化的休耕地空间配置模式。

（3）中国地域广阔，自然资源禀赋区域差异明显，社会经济发展水平也存在地区间的不均衡性，休耕必将对粮食安全、耕地保护、土地管理、社会经济发展等产生深刻影响。由于休耕牵涉面广、因素复杂，因此休耕的推广应采取“统一布署、分区实践”的方式，尽早明确休耕的基本原则，建立“国家—区域—地方”自上而下的目标体系以及“村—镇—县—省”自下而上的休耕规模与布局方案体系，进而因地制宜有序开展休耕。

注释：

①根据晴隆县农业农村发展规划，并参考实际调研获取的耕地利用资料，研究期内晴隆县的农作物种植结构、粮作比、复种指数基本保持不变。

参考文献(References)

[1] Yang H, Shen X, Lai L, et al. Spatio-temporal variations of health costs caused by chemical fertilizer utilization in China from 1990 to 2012. Sustainability, 2017, 9(9): 1505.

[2] Yang H. China's soil plan needs strong support. Nature, 2016, 536(7067): 375-375.

[3] Liu Y, Huang X, Yang H, et al. Environmental effects of land-use/cover change caused by urbanization and policies in Southwest China Karst area: A case study of Guiyang. Habitat International, 2014, 44: 339-348.

[4] Long Hualou, Li Tingting. Analysis of the coupling of farmland and rural housing land transition in China.

Acta Geographica Sinica, 2012, 67(2): 201-210. [龙花楼, 李婷婷. 中国耕地和农村宅基地利用转型耦合分析. 地理学报,2012, 67(2): 201-210.]

[5] Song Xiaoqing. Discussion on land use transition research framework. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3): 471-487.[宋小青. 论土地利用转型的研究框架. 地理学报, 2017, 72(3): 471-487.]

[6] Yang Qingyuan, Xin Guixin, Jiang Juanli, et al. The comparison and implications of crop rotation and fallow in the Western Countries and East Asia. China Land Sciences, 2017, 31(4): 71-79. [杨庆媛, 信桂新, 江娟丽, 等. 欧美及东亚地区耕地轮作休耕制度实践: 对比与启示. 中国土地科学, 2017, 31(4): 71-79.]

[7] Fraser R. Moral hazard and risk management in agri-environmental policy. Journal of Agriculture Economics, 2002, 53(3): 475-487.

[8] Gilg A W, Battershill M. Quality farm food in Europe: A possible alternative to the industrialised food market and to current agri-environmental policies: Lessons from France. Food Policy, 1998, 23(1): 25-40.

[9] Reimer A, Prokopy L. One federal policy, four different policy contexts: An examination of agri-environmental policy implementation in the Midwestern United States. Land Use Policy, 2014, 38(4): 605-614.

[10] Zellei A, Gorton M, Lowe P. Agri-environmental policy systems in transition and preparation for EU membership. Land Use Policy, 2005, 22(3): 225-234.

[11] Cai R, Mullen J D, Wetzstein M E, et al. The impacts of crop yield and price volatility on producers' cropping patterns:A dynamic optimal crop rotation model. Agricultural Systems, 2013, 116(116): 52-59.

[12] Hodge I. Beyond agri- environmental policy: Towards an alternative model of rural environmental governance. Land Use Policy, 2001, 18(2): 99-111.

[13] Jiang Juanli, Yang Qingyuan, Yan Jianzhong. Research progress and realistic role for reference in farmland fallowing.Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017, 39(1): 165-171. [江娟丽, 杨庆媛, 阎建忠. 耕地休耕的研究进展与现实借鉴. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(1): 165-171.]

[14] Deng Linlu, Wang Jihong, Liu Jingshuang, et al. Influence of fallow rotation on the black soil acidification. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 184-188. [邓琳璐, 王继红, 刘景双, 等. 休耕轮作对黑土酸化的影响. 水土保持学报, 2013, 27(3): 184-188.]

[15] Xing Fu, Zhou Jingying, Jin Yongjun, et al. History, theory and practice of pasture- crop rotation in China: A review.Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 245-255. [邢福, 周景英, 金永君, 等. 我国草田轮作的历史、理论与实践概览.草业学报, 2011, 20(3): 245-255.]

[16] Yin Ke, Xiao Yi. Empirical research on household willingness and its caused factors for economic compensation of eco-fallow in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(9):1123-1129. [尹珂, 肖轶. 三峡库区消落带农户生态休耕经济补偿意愿及影响因素研究. 地理科学, 2015,

35(9):1123-1129.]

[17] Chen Zhantu, Yang Qingyuan. Fundamental framework of China's fallow system. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12): 126-136. [陈展图, 杨庆媛. 中国耕地休耕制度基本框架构建. 中国人口·资源与环境,2017, 27(12): 126-136.]

[18] Li Fanfan, Liu Youzhao. A preliminary study on the potentialities of cultivated land in china under the prerequisite of grain security. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(Suppl.): 35-41. [李凡凡, 刘友兆. 中国粮食安全保障前提下耕地休耕潜力初探. 中国农学通报, 2014, 30(增刊): 35-41.]

[19] Zhao Yuntai, Huang Xianjin, Zhong Taiyang, et al. Simulating fallow land at regional scale: size and spatial distribution.Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(5): 107-111. [赵雲泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域虚拟休耕规模与空间布局研究. 水土保持通报, 2011, 31(5): 107-111.]

[20] Zhang Xinbao, Wang Shijie, Cao Jianhua, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area. Carsologica Sinica, 2010, 29(3): 274-279. [张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.]

[21] Zhang Xiaonan, Wang Kelin, Zhang Wei, et al. The quantitative assessment of eco-environment vulnerability in karst regions of Northwest Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 749-757. [张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性. 生态学报, 2009, 29(2): 749-757.]

[22] Hou Wenjuan, Gao Jiangbo, Peng Tao, et al. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure-function-habitat framework. Progress in Geography, 2016, 35(3): 320-330. [侯文娟, 高江波,彭韬, 等. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展. 地理科学进展, 2016, 35(3): 320-330.]

[23] Xiong Kangning, Chi Yongkuan. The problems in Southern China karst ecosystem in southern China and its countermeasures. Ecological Economy (Chinese Edition), 2015, 31(1): 23-30. [熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策. 生态经济(中文版), 2015, 31(1): 23-30.]

[24] Guo Bing, Jiang Lin, Luo Wei, et al. Study of an evaluation method of ecosystem vulnerability based on remote sensing in a southwestern karst mountain area under extreme climatic conditions. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7219-7231. [郭兵, 姜琳, 罗巍, 等. 极端气候胁迫下西南喀斯特山区生态系统脆弱性遥感评价. 生态学报, 2017, 37(21):7219-7231.]

[25] Xiao Hua, Xiong Kangning, Zhang Hao, et al. Research progress for karst rocky desertification control models. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(Suppl.1): 330-334. [肖华, 熊康宁, 张浩, 等. 喀斯特石漠化治理模式研究进展. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(Suppl.1): 330-334.]

[26] Yao Yonghui. Progress and prospect of karst rocky desertification research in Southwest China. Progress in Geography,2014, 33(1): 76-84.[姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望. 地理科学进展, 2014, 33(1): 76-84.]

[27] De Lange H J, Sala S, Vighi M, et al. Ecological vulnerability in risk assessment: A review and perspectives. Science of the Total Environment, 2010, 408(18): 3871-3879.

[28] Tian Yaping, Chang Hao. Bibliometric analysis of research progress on ecological vulnerability in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1515-1525. [田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报,2012, 67(11): 1515-1525.]

[29] Huang Guoqin, Zhao Qiguo. A discussion on land fallow rotation problem. Ecology and Environmental Sciences, 2017,26(2): 357-362.[黄国勤, 赵其国. 轮作休耕问题探讨. 生态环境学报, 2017, 26(2): 357-362.]

[30] An Yulun. A tentative study on structure and function of man- land relationship areal system in karst terrains.Carsologica Sinica, 1994, 13(2): 153-159. [安裕伦. 喀斯特人地关系地域系统的结构与功能刍议: 以贵州民族地区为例. 中国岩溶, 1994, 13(2): 153-159.]

[31] Li Yangbing, Tan Qiu, Wang Shijie. Current status, problems analysis and basic framework of karst rocky desertification research. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 27-34. [李阳兵, 谭秋, 王世杰. 喀斯特石漠化研究现状、问题分析与基本构架. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 27-34.]

[32] Wu Gang, Gao Lin. Research on exploitation and sustainable development countermeasure of marginal lands in the Three Gorge Reservoir Areas. Environment science, 1998(1): 90-94. [吴刚, 高林. 三峡库区边际土地的合理开发及其可持续发展. 环境科学, 1998(1): 90-94.]

[33] Wang Liwen. Research on the land sustainable use in the north vulnerable areas of China. Chinese Rural Economy, 2003(12): 58-63. [王利文. 北方生态脆弱地区土地可持续利用研究. 中国农村经济, 2003(12): 58-63.]

[34] Zhu Kunyan. Problems and countermeasures of Chinese food security in the new normal economy. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(4): 209-213. [祝坤艳. 经济新常态下我国粮食安全问题及发展研究. 中国农业资源与区划, 2016, 37(4): 209-213.]

[35] Wu Lianglin, Luo Jianping, Li Man. Evaluation method of land- scaled consolidation potential based on landscape pattern principle. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 300-306. [吴良林, 罗建平, 李漫. 基于景观格局原理的土地规模化整理潜力评价方法. 农业工程学报, 2010, 26(2): 300-306.]

[36] Tian Yaping, Xiang Qingcheng, Wang Peng. Regional coupled human-natural systems vulnerability and its evaluation indexes. Geographical Research, 2013, 32(1): 55-63. [田亚平, 向清成, 王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系. 地理研究, 2013, 32(1): 55-63.]

[37] Eakin H, Luers A L. Assessing the vulnerability of social-environmental systems. Annual Review of Environment and Resources, 2006, 5(31): 365-394.

[38] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping dia-gram. Global Environmental Change, 2007, 17(3): 472-485.

[39] Li Dongmei, Gao Zhengwen, Fu Xiao, et al. Characteristic of ecological sensitivity in Yunnan ecological zones. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(1): 138-145. [李东梅, 高正文, 付晓, 等. 云南省生态功能类型区的生态敏感性. 生态学报, 2010, 30(1): 138-145.]

[40] Fan Feide, Wang Kelin, Xiong Ying, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions,Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(21): 6353-6362. [凡非得, 王克林, 熊鹰, 等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征. 生态学报, 2011, 31(21): 6353-6362.]

[41] Xiong Kangning, Li Jin, Long Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 878-888. [熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.]

[42] Liu Chunxia, Li Yuechen, Yang Hua, et al. RS and GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges Reservoir area of Chongqing. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 631-642. [刘春霞, 李月臣, 杨华, 等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价. 地理学报, 2011, 66(5): 631-642.]

[43] Wan Jun, Cai Yunlong, Lu Yunge, et al. Soil erosion risk assessment in karst area: Case study in Guanling County of Guizhou Province. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(3): 148-153. [万军, 蔡运龙, 路云阁, 等. 喀斯特地区土壤侵蚀风险评价: 以贵州省关岭布依族苗族自治县为例. 水土保持研究, 2003, 10(3): 148-153.]

[44] Sun Yan, Lin Zhenshan, Jin Xiaobin, et al. Dynamic model and measures of total area of farmland in China. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(3): 337-342. [孙燕, 林振山, 金晓斌, 等. 中国耕地保有量的动力预测模型及对策. 地理科学, 2008, 28(3): 337-342.]

[45] Song Xiaoqing, Ouyang Zhu. Key influencing factors of food security guarantee in China during 1999- 2007. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(6): 793-803. [宋小青, 欧阳竹. 1999-2007 年中国粮食安全的关键影响因素. 地理学报,2012, 67(6): 793-803.]