

DOI: 10.5846/stxb202104050878

易兴松,戴全厚,严友进,张吟,何洁,王勇,姚一文.西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展.生态学报,2023,43(3):925-936.

Yi X S, Dai Q H, Yan Y J, Zhang Y, He J, Wang Y, Yao Y W. Research progress on the ecological environment effect of farmland abandonment in karst areas of Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 925-936.

西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展

易兴松^{1,2}, 戴全厚^{1,2,*}, 严友进^{1,2,3}, 张吟⁴, 何洁^{1,2}, 王勇^{1,2}, 姚一文^{1,2}

1 贵州大学林学院, 贵阳 550025

2 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025

3 贵州省森林资源与环境研究中心, 贵阳 550025

4 贵州省城乡规划设计研究院, 贵阳 550081

摘要:耕地撂荒是多驱动力综合作用的结果,不同地域下的撂荒地生态环境影响具有其特殊性。针对当前西南喀斯特地区耕地撂荒现象,综述了目前在西南喀斯特地区撂荒地生态环境影响方面取得的研究进展及未来的研究展望。综合现有研究结果发现:①务农机会成本增加,以粗放经营为主要特点的隐性撂荒可能是现代石漠化发展的潜在动力;②喀斯特地区的土壤异质性决定了耕地撂荒后地块尺度的景观均质性或者区域尺度的景观异质性;③喀斯特地区耕地撂荒后植被恢复能在一定程度上改善土壤结构、维持土壤水分、促进土壤养分恢复;④撂荒初期土壤侵蚀加剧,撂荒后期植被恢复防治土壤侵蚀;⑤耕地撂荒植被恢复后增强了喀斯特地区植被碳汇、土壤碳汇和岩溶碳汇效应。未来,应明确隐性撂荒对喀斯特地区生态环境的具体影响,创新技术手段动态监测优等地和石漠化耕地的撂荒面积及趋势变化,定量显性撂荒在水土流失防治和石漠化生态恢复中的贡献,综合评估撂荒地的碳汇效应,从而为合理配置喀斯特地区耕地的社会、生态功能建言献策。

关键词:喀斯特;隐性撂荒;显性撂荒;生态效应;石漠化

Research progress on the ecological environment effect of farmland abandonment in karst areas of Southwest China

YI Xingsong^{1,2}, DAI Quanhou^{1,2,*}, YAN Youjin^{1,2,3}, ZHANG Yin⁴, HE Jie^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, YAO Yiwen^{1,2}

1 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Research Center for Soil Erosion & Ecological Restoration, Guizhou University, Guiyang 550025, China

3 Institute for Forest Resources & Environment of Guizhou, Guiyang 550025, China

4 Urban-Rural Planning & Design Institute of Guizhou, Guiyang 550081, China

Abstract: Farmland abandonment is the result of comprehensive effects by multiple driving forces. Ecological environment impact by farmland abandonment has its particularity in different regions. Aiming at the current phenomenon of farmland abandonment in the southwest karst areas, this paper summarizes the current research progress and future research prospects on the ecological environment impact of farmland abandonment in karst areas of the southwest China. By summarizing existing studies on ecological and environmental effects by farmland abandonment, it revealed that: (1) the opportunity cost of farming increased. The implicit abandonment being mainly characterized by extensive management may be the potential driving force for modern development of rocky desertification; (2) The soil heterogeneity in the karst areas determines the landscape homogeneity at the plot scale or the landscape heterogeneity at the regional scale after a farmland abandoned; (3) Vegetation restoration after abandonment of farmland in karst areas can improve soil structure, maintain soil moisture and

基金项目:国家自然科学基金项目(42167044, 42007054);中国博士后科学基金项目(2020M673296);贵州省研究生科研基金项目(黔教合YJSCXJH[2020]066)

收稿日期:2021-04-05; **网络出版日期:**2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qhdairiver@163.com

promote soil nutrient restoration to a certain extent; (4) Soil erosion intensifies in early stage of abandonment, and soil erosion will be prevented and controlled by restoration of vegetation in later stage of abandonment; (5) The restoration of vegetation on abandoned farmland enhances the effects of plant carbon sink, soil carbon sink and karst carbon sink in karst areas. In the future, the specific impact of implicit abandonment on ecological environment of karst areas should be clarified, innovative technical means should be used to dynamically monitor the abandoned area of prime farmland and rocky desertified farmland, as well as their abandonment trend changes, the contribution of explicit abandonment in soil erosion control and ecological restoration of rocky desertification should be quantified, and the carbon sink impact of abandoned land should be comprehensively assessed. Therefore, it may offer suggestions for the rational allocation of social and ecological functions of farmland in karst areas.

Key Words: karst; implicit abandonment; explicit abandonment; ecological effect; rocky desertification

近年来,弃耕撂荒地成为土地利用/土地覆盖变化最重要的研究热点之一^[1]。随着我国城市化进程的不断加强,农村地区人地矛盾减缓,耕地边际效应进一步促进耕地撂荒。现阶段我国耕地撂荒呈现撂荒面积、撂荒率双增长,撂荒现象趋于普遍和由贫瘠、破碎地块向肥沃、连片耕地蔓延的新特征^[2-6]。孔祥斌^[7]研究发现西南山区耕地撂荒面积在 10% 左右。而西南喀斯特地区土层浅薄不连续,土地贫瘠且坡耕地较多^[8],优质土地资源稀缺,石漠化面积达到了 10.06 万 km²^[9]。耕地撂荒是粮食安全的潜在威胁,但石漠化耕地撂荒后植被次生演替促进区域生态恢复,也有利于西南喀斯特地区防治石漠化。

中国西南(约 55 万 km²)是全球三大岩溶集中分布区中连片裸露碳酸盐岩面积最大、岩溶发育最强烈的地区^[10]。由于不合理的土地利用^[11-12],植被破坏、水土流失严重,石漠化现象突出,也是生态环境问题最严重的地区之一^[13-15]。如何有效地遏制石漠化发展和科学地促进生态恢复是中国西南喀斯特地区可持续发展中的首要难题^[16-17]。投入有限的情况下,耕地撂荒自然恢复可能是一种切实有效的生态恢复措施^[18-19]。

耕地撂荒的定义有很多种,从农户的主动撂荒形式可分为显性撂荒和隐性撂荒^[20]。显性撂荒是指除自然灾害等不可抗拒的外部因素外,由于耕地承包经营者主观方面的原因,导致耕地没有种植农作物而闲置的状态^[21];隐性撂荒指田块上依旧播种农作物,但投入田块的人、财、物有意识的降低,导致耕地利用效率下降、产出水平降低^[22]。而耕地撂荒因子的区域响应并不一致,导致耕地撂荒具有地域性。目前,国外研究主要以耕地撂荒对自然环境的具体影响为主^[23-25],国内则重点关注的是耕地撂荒对粮食安全的潜在威胁^[26-27],而针对于中国西南喀斯特地区耕地撂荒的生态环境效应研究更是少见。为此,本文在剖析了西南喀斯特地区耕地撂荒原因及特点基础之上,结合耕地撂荒前后的生态响应,从隐性撂荒和显性撂荒的角度,分别探讨了耕地撂荒对景观格局、土壤肥力、土壤侵蚀及碳汇方面的生态环境效应,提出其中存在的科学问题,对未来研究方向进行展望,以为喀斯特地区遏制石漠化发展、低成本生态恢复和合理规划耕地用途提供启示和借鉴。

1 西南喀斯特地区耕地撂荒原因及特点

中国耕地撂荒大多发生在山地丘陵较多的省份^[28]。自 2000 年以来,由于劳动力流失和快速城镇化等原因,山区耕地利用边际化特征和现象明显^[29]。李升发等^[30]对全国山区抽样调查发现,235 个调查村庄里面有 78.3% 的村庄出现撂荒现象,2014—2015 年全国山区县耕地撂荒率为 14.32%。目前,耕地撂荒呈隐性撂荒向显性撂荒,季节撂荒向常年撂荒趋势发展,总体呈“西南高、东北低”的空间格局^[31-32]。其中西南山地在脆弱的喀斯特地质背景下形成的“石漠化耕地”容易撂荒^[33](图 1)。比如, Han 等^[2]基于遥感调查数据指出,2001—2015 年贵州省和广西省山区 10.45% 的耕地面积已被撂荒。究其撂荒原因,西南喀斯特地区山高坡陡,土层浅薄不连续^[34],地下漏失导致地表土壤缺水,土壤肥沃但土壤总量少^[35],土地贫瘠,是典型的生态脆弱区^[36]。坡耕地占比高,在不合理的人为活动下水土流失强烈^[37],土壤及养分流失后土地生产力急剧下降,石漠化严重。在上述客观条件下,务农机会成本增加,劳动力析出,农地边际效应促使该区域耕地撂荒事件频

发^[26]。而水力侵蚀的严重程度更是决定该区域撂荒地空间分布差异的关键因素^[2]。

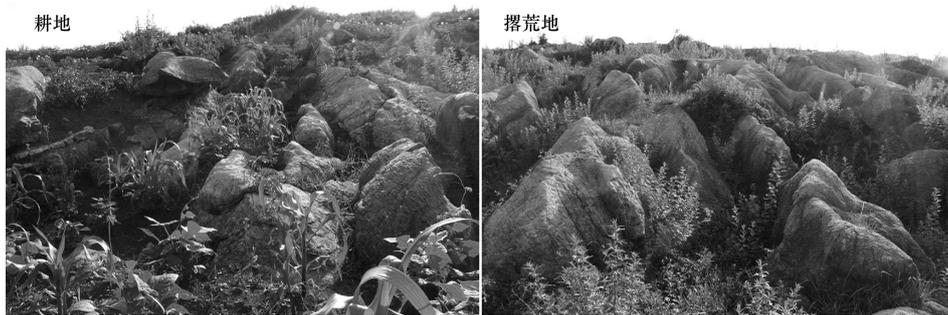


图1 喀斯特石漠化坡耕地(种植玉米)及撂荒地

Fig.1 Rocky desertification sloping farmland (Grow corn) and abandoned farmland in Karst areas

耕地撂荒是多尺度多因素综合作用的结果,其影响因素的复杂性导致不同地区的耕地对撂荒影响因子的响应不一^[26],即表现出耕地撂荒地地域性^[27,38-39]。西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境特点如下:①地貌类型多样,地形切割破碎^[40-41]。因家庭联产承包制影响,耕地地块进一步分散^[42]。地块小而分散阻碍机械有效替代,增加通勤成本,导致撂荒可能性增大^[43]。②山高坡陡,坡耕地较多。西南地区坡耕地占耕地资源的比例高达 54.38%^[44]。③土层浅薄不连续,成土速度慢,土壤流失后演变为石质坡地无法耕作^[45]。多数碳酸盐岩酸不溶物含量低于 10%,纯石灰岩或白云岩甚至低于 1%,其中纯碳酸盐岩母质上发育 1 m 厚的土层需要 250—7800 ka,是非岩溶区的 10—40 倍^[46]。④碳酸盐岩发育的土壤富钙镁,但其他营养元素缺乏^[35],尤其是钾含量低的土壤环境仅适宜生长耐瘠、抗旱嗜钙的岩生性植被^[47],有碍农作业发展。⑤地下孔隙发育,水土地下漏失^[48],工程性缺水导致耕作困难^[49]。⑥受全球气候变化影响,西南地区极端暴雨或者干旱较为频繁,自然灾害严重^[50],农作业呈低收益高风险态势。⑦历史时期人地矛盾突出,广种薄收,遗留大面积的陡坡耕地。例如,贵州省 2014 年土地利用变更调查统计显示,坡耕地面积仍有 379.33 万 hm²,占耕地资源比例高达 83.55%^[51]。脆弱的耕作环境增加了务农机会成本,促进了耕地撂荒现象的发生,但耕地撂荒后的自然植被演替和恢复改变了农村土地利用状况和农业景观,并带来了巨大的生态环境改变。

2 西南喀斯特地区耕地撂荒的生态环境效应研究进展

喀斯特生态系统恢复力稳定性低,生态环境脆弱^[52]。然而尖锐的人地矛盾造成地表土壤大量流失,石漠化面积持续扩大,进一步破坏了生态平衡^[53-55]。随着社会经济发展,受耕地边际效应驱动,劳动力析出到第二、三产业,人地矛盾减缓,耕地撂荒就是人地关系缓和的直接体现^[17,56-57]。石漠化耕地的显性撂荒一定程度上促进了石漠化区域的生态恢复,粗放经营的隐性撂荒则可能是潜在的石漠化动力(图 2)。石漠化发展新形势下,喀斯特地区撂荒地的生态环境效应将成为石漠化生态恢复研究的焦点。

2.1 西南喀斯特地区隐性撂荒生态环境效应

郭贝贝等^[58]对包含贵州、广西、云南等 25 个省(自治区)的家庭追踪数据分析发现全国耕地隐性撂荒比例较高,达到了 20.39%,隐性撂荒概率最低的浙江省为 12.10%。可见,耕地隐性撂荒的概率已经不容小视。而喀斯特地区地表—地下二元水文结构极易导致水土漏失,抗旱保墒能力差^[44]。农户粗放经营又导致隐性

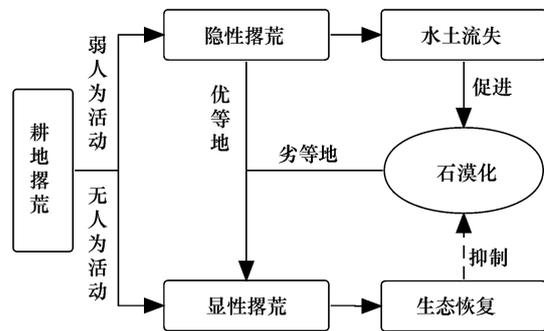


图2 喀斯特地区耕地撂荒对石漠化发展的影响

Fig.2 Influence of abandoned farmland on the development of rocky desertification in Karst Areas

撂荒耕地水土保持措施缺乏,常年不翻耕影响土壤入渗。受全球气候变化影响,极端暴雨和干旱频繁^[59],隐性撂荒方式进一步紊乱了坡耕地土壤水分调节功能。同时,有机肥投入不足,化肥使用不平衡,土壤有机质减少,孔隙度变差,阳离子吸附能力减弱,土壤板结严重,影响水热气肥循环^[60];轮作转换为单作,犁底层加厚^[61],耕层变浅,严重影响作物生产力,降低粮食产量^[62-63]。综合来看,水土流失导致土地生产力下降的基础上,隐性撂荒可能造成喀斯特地区耕地土壤肥力进一步退化。

与显性撂荒相比,隐性撂荒的指标鉴定相对困难,其中耕地细碎化、农业生产投入减少和土地征用是隐性撂荒的主要原因,但缺乏有效的定量评估^[22,58]。有研究表明,喀斯特地区人地矛盾推动了生态环境的恶化,而农户对土地的依赖比对土地的负荷产生的环境影响更大^[64-65]。因此,隐性撂荒可能是现代石漠化发展的潜在动力。而石漠化景观的不均一性是高度异质性的地质地貌在差异性的人类活动中形成的^[66-68]。按成因分为以下2种类型(图3):一是第四纪以来自然环境变化引起的原生石漠化,人类只能加速或者减缓这一过程^[35];二是是由于人口压力超过了土地承载力,不合理的人类活动加剧土壤侵蚀,造成基岩大面积裸露的次生石漠化^[69]。但历史时期的次生石漠化是人为粗放利用下广种薄收、只种不养造成的^[64],该时期土壤侵蚀强度大、石漠化面积广;而现代时期的次生石漠化则是部分耕地在劳动或者农业生产性投入减少的粗放经营下,隐性撂荒或者缓坡耕作导致的石漠化^[65],石漠化发展趋势大幅减缓^[56]。喀斯特地区成土速度极慢,保住土壤是喀斯特地区防治石漠化的关键^[70]。隐性撂荒背景下,小面积低强度的土壤侵蚀依然会促进石漠化的发展。当前关于喀斯特耕地隐性撂荒的研究较为匮乏,相关的报道也不多。李阳兵等^[64]、苗建青^[67]通过分析喀斯特地区耕地与石漠化之间的内在关系指出粗放经营是石漠化形成的本质。目前喀斯特地区隐性撂荒的生态环境效应更是少有人关注,隐性撂荒对耕地土壤肥力变化、土壤侵蚀强度等的影响尚不明确,需要在以后的研究中进行专题调查^[4]。整体而言,喀斯特地区隐性撂荒的生态环境效应需要引起足够的重视。



图3 石漠化发展阶段

Fig.3 Development stage of rocky desertification

2.2 西南喀斯特地区显性撂荒生态环境效应

耕地停止耕种之后,缺少管理的半自然人工生态系统随时间逐渐演替为自然生态系统,同时带来显著的生态环境效应^[71](图4)。本文将基于喀斯特地区特殊的地质背景,从景观格局、土壤肥力、土壤侵蚀和碳汇等方面阐述耕地显性撂荒的生态环境效应研究现状与进展。

2.2.1 显性撂荒对喀斯特地区景观格局的影响

撂荒耕地随着植被次生演替的进行,传统的农业景观彻底改变^[72]。常态地貌撂荒地次生演替植被的均质性较高,由于撂荒时间和范围的差异,可能存在单一地块尺度的均质性、也可能存在异地搬迁的区域均质性,高度均质化的植被恢复容易引起火灾风险^[73]。然而喀斯特地区的耕地环境异质性导致该区域的撂荒地景观格局相对复杂^[74]。地貌类型从宏观上控制着喀斯特地区的侵蚀特征,高原山地水土流失严重、高原盆地侵蚀量小、高原峡谷区侵蚀量极少^[75]。次生植被的恢复程度取决于地表物质的组成情况^[55]。土壤侵蚀强度则影响着不同地貌条件下的耕地石漠化等级,基岩出露形成石槽、石缝、石沟等小生境^[76],从而造成了耕地环

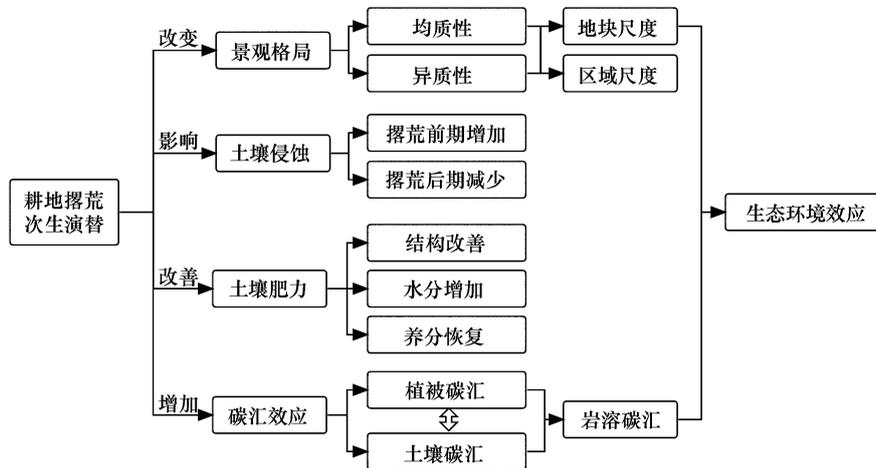


图 4 喀斯特地区显性撂荒地生态环境效应

Fig.4 Eco-environmental effects of dominant abandoned farmland in Karst areas

境异质性,进而导致了石漠化耕地和非石漠化耕地撂荒后植被恢复的景观格局异质性。比如,王玲玉等^[77]结合地块时序归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)进行了喀斯特山区撂荒地的精准识别指出,非喀斯特撂荒地 NDVI 总体水平比石漠化撂荒地高,石漠化等级高低与 NDVI 曲线整体水平呈反比关系。由于坡度、高程、年降雨量、年均温、地块破碎度等^[78-79]也是影响耕地是否撂荒的客观因素。因此,喀斯特地区撂荒地景观格局变化还需结合不同的环境因子和地貌特点进行专项研究。

喀斯特地区耕地撂荒之后,植被正向演替主要分为两种类型。比如,沿自然过程恢复:草本群落阶段→草灌群落阶段→灌丛灌木阶段→灌乔过渡阶段→乔林阶段→顶级群落阶段^[80];此时,植被次生演替较为缓慢,自然恢复 40—50 年可有较为正常的组成、外貌和结构^[81-82]。而当撂荒耕地周围有种源存在时,群落演替可不经草坡、灌丛草坡、灌木林阶段,而直接演替至乔木阶段^[83]。植被指数、植被覆盖度以及景观格局指数等都能在一定程度上反映撂荒地生态恢复的景观格局或者撂荒地面积的变化。例如,徐倩等^[84]用景观格局指数分析郎溪槽谷区撂荒地演变,指出郎溪槽谷区撂荒地聚集度指数、最大斑块指数、景观形状指数和斑块密度在整个研究区变化较为明显,撂荒之后耕地演变为林灌草并存,生态环境得到一定改善;李阳兵等^[85]通过高分辨率遥感影像和实地调查数据发现,茂兰喀斯特自然保护区由较小的耕地闲置逐渐发展到斑块面积较大的优质耕地撂荒。目前对于喀斯特地区撂荒地景观格局变化的研究较少,喀斯特地区地块破碎,山区气候原因导致高清影像获取较为困难是其限制因素。未来亟需针对西南喀斯特地区开发更高精度的撂荒地遥感调查方法,整合多时相多来源遥感数据明确撂荒地的趋势变化,识别石漠化耕地和优等地撂荒的具体面积,定量显性撂荒后植被恢复对石漠化治理的贡献。

2.2.2 显性撂荒对喀斯特地区土壤肥力的影响

耕地撂荒对生态环境产生积极影响还是消极影响学术界没有明确观点^[5,26-27]。但研究发现,喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应明显区别于常态地貌撂荒地的生态环境影响^[84]。通常,水分^[86-87]和养分缺乏^[88]是喀斯特土壤的限制性因素,而耕地撂荒后植被恢复是否对喀斯特土壤物理性质有所影响需要进一步明确。

喀斯特地表—地下“二元三维”水文系统导致该地区地下水土漏失严重^[89]。耕地显性撂荒对于维持土壤水分具有积极作用,其中降雨和蒸发是影响土壤水分的关键^[74]。张继光等^[90]对桂西北峰丛洼地中撂荒坡耕地调查发现,土壤水分随降雨呈增高趋势,且在雨后三天土壤含水量才达到最大值。同时,傅伟等^[91]对比分析了桂西北喀斯特坡地 5 种土地利用类型,指出喀斯特坡地土壤含水量主要受降水的影响,撂荒地借助草被、匍匐类作物减少地表蒸发,一定程度上保持了土壤水分。而研究表明,不同次生演替阶段土壤的水分也有所差异。田涟祎等^[92]对贵州省花江喀斯峡谷示范区土壤调查发现,随着撂荒地植被的正向演替土壤含水

量大小依次为:撂荒地<自然灌丛<林地。而耕地撂荒之后土壤水分逐渐上升,撂荒地田间持水量显著高于农田^[93-94]。较小的土壤扰动、植物根系和凋落物增加能有效降低土壤容重,改善土壤孔隙度,造成自然恢复的撂荒地土壤渗透性比人工林更好^[95],土壤含水量更高。综上所述,耕地撂荒后植被正向演替有利于改善土壤理化性质、促进喀斯特土壤的水源涵养。在今后的研究中,还可从不同撂荒时间、不同空间尺度上评价撂荒地土壤水分变化对区域水文生态系统的影响。

喀斯特地区耕地撂荒之后人为活动减弱,植被次生演替改善耕地土壤物理性质。比如,周忠发等^[96]对喀斯特峰丛盆地区7种土地利用方式下的土壤调查指出撂荒地总孔隙度最大,且非毛管孔隙较高,占总孔隙的34.45%—55.42%。自然恢复能有效增加土壤孔隙度,降低土壤容重^[88],而土壤容重、含水率等又与土壤抗剪强度密切相关^[97]。陈晨等^[98]在典型石漠化区发现撂荒地、乔木林地、灌木林地、坡耕地4种土地利用方式中,撂荒地抗剪强度最高。Li等^[99]在贵州省黔西县对比耕地和撂荒地抗剪强度发现,耕地撂荒后土壤抗剪强度显著提高,极限抗剪强度提高了65.5%。此外,耕地撂荒后土壤团聚体稳定性也进一步提高^[100]。在耕地和撂荒地表层土壤中,撂荒地表层土壤中>0.25 mm水稳性大团聚体含量显著高于耕地土壤,而在表下层土壤中团聚体稳定性差异较小^[101]。陈佳等^[102]经主成分分析土壤团聚体相关指标发现喀斯特地区人为干扰严重降低了土壤抗蚀性,耕地撂荒则能够提高土壤抗蚀性。

喀斯特土壤是肥沃的,但土壤总量少、养分总量低,土地是贫瘠的^[35]。耕地撂荒后植被次生演替,撂荒时间越长、次生演替阶段越高有助于喀斯特土壤养分配累^[103-104]。赵楚等^[105]对贵州省花江峡谷地区的乔木林地、灌木林地、草地和撂荒地土壤调查发现,土壤氮、磷有效性随植被群落的进展演替呈现出递增的变化规律。曾馥平等^[18]、刘艳等^[106]综合分析耕地、人工林地、火烧地、撂荒地等地类中土壤有机质、全氮、全磷、全钾等养分含量发现,随撂荒时间的增加,撂荒地自然恢复的效果相对较好^[107]。但也有研究指出随时间变化,自然演替土壤存在氮、磷缺乏的风险,撂荒早期需要适当的人工干预才能实现石漠化治理的可持续发展^[108-110];而短年限撂荒恢复效果不佳,如撂荒草地养分含量显著低于人工植被-花椒、金银花、核桃砂仁等恢复模式^[111-112]。白义鑫等^[113]、伍方骥等^[19]对比不同石漠化植物治理措施发现不同恢复方式均能显著提升喀斯特地区土壤碳氮固持,在考虑抵抗极端气候的条件下自然恢复效应更好。可见,自然恢复方式也能有效提高土壤养分,投入较少的情况下,自然抛荒是一种可行的生态恢复措施。当前,还需进一步明确撂荒前期土壤的限制因素(比如氮、磷)以便人工干预促进生态恢复,而演替后期是否还受到相关限制作用也需要进一步探究。

2.2.3 显性撂荒对喀斯特地区土壤侵蚀的影响

喀斯特石漠化是由于不合理的人为活动导致土壤流失、呈现大面积基岩裸露景观的土地退化过程^[48]。近年来,耕地边际化效应促使农户优先撂荒了土壤侵蚀严重、生产力下降的石漠化耕地,土壤侵蚀形势有所减缓。撂荒初期的耕地土壤相对松软,降雨直接作用在地表产生较大的土壤侵蚀力,从而造成较大的土壤侵蚀量^[114]。比如,闫伟^[115]在贵州省施秉县通过径流小区观测发现撂荒初期水土流失量大于耕地、林地、经果林地等土地利用方式。撂荒后期植被恢复减缓降雨影响,土壤物理结构改善后提高入渗速率降低地表径流冲刷速度,进而削弱了土壤侵蚀强度^[5]。李瑞等^[116]、曾馥平等^[117]在典型喀斯特地区通过野外监测试验发现自然恢复的撂荒地具有较好的水土保持功能。李华林等^[118]在贵州省凯掌典型小流域内设置径流小区定位观测发现撂荒地年平均产沙量最少为29.57 g/a,最多为坡耕地1436.59 g/a,撂荒年限长、植被覆盖度高是撂荒地减沙效果好的根本原因。因此,撂荒年限与土壤侵蚀呈非线性关系,撂荒初期表现为土壤侵蚀,在撂荒后期表现为土壤恢复。

西南喀斯特地区是水力侵蚀区,影响土壤侵蚀速率的先导因子是降雨强度,撂荒地植被恢复有利于减缓水力侵蚀强度。但撂荒前耕地的土层厚度对撂荒后的土壤侵蚀强度变化有显著影响。石质耕地撂荒时,自身几乎无土可流,所以撂荒后植被恢复与否对土壤侵蚀强度影响不大;而植被恢复带来的水土保持效应对土壤资源相对丰富的撂荒地至关重要。因此,喀斯特地区耕地撂荒后的土壤侵蚀强度判断还需要考虑撂荒前的耕地条件。同时,目前国家正在大力推进撂荒地复耕,其中的水土流失风险少有人关注。撂荒后生态恢复的石

漠化耕地需要防止“二次石漠化”,哪些区域适合复耕?潜在的水土流失防治措施值得深思。

2.2.4 显性撂荒对喀斯特地区碳汇的影响

农作物生物量小碳汇作用有限^[119],被消费后“碳”又返还于生态系统中。但耕地显性撂荒后植被恢复直接增加了地表植被碳汇储量,且植被次生演替等级越高植被碳储量越大。比如,张明阳等^[120]研究发现封山育林、退耕还林(草)等石漠化生态恢复措施使桂西北喀斯特区植被碳储量显著增加。杨龙^[121]对比了毕节花江和撒拉溪两个石漠化治理示范区发现,随着植被向顶级群落演替,地表植被的碳汇量也呈现明显增加趋势。由于植被恢复兼有水土保持的作用,进一步稳定了土壤碳库,对增加陆地土壤有机碳含量(Soil organic carbon, SOC)具有积极作用^[122]。Wang 等^[123]在广西省西北部通过原位监测对比分析了 1983 年至 2015 年样地 SOC 的变化,发现撂荒地植被次生演替明显提高了 0—15 cm 范围内的 SOC。撂荒初期 SOC 恢复速度相对缓慢,随撂荒时间推移,土壤碳汇效应逐步显现。廖洪凯等^[124]在贵州普定陈家寨石漠化治理区发现撂荒 15 年草丛 SOC 大于撂荒 3 年草丛 SOC。在人为活动减弱^[125]、植被恢复土壤结构改善^[88]和凋落物、腐根等增加地表有机质输入的影响下^[126],SOC 表现为表层大于下层^[127]。耕地撂荒之后表层土壤团聚体迅速恢复,大团聚体增加且团聚体稳定性较高^[128],SOC 随土壤团聚体稳定性的增加而增加^[129—130],但较短撂荒时间内(3—8 年)SOC 恢复缓慢^[131]。例如,人工林和撂荒地都能促进喀斯特地区 SOC 的积累,短时间的生态恢复并不能判断那种方式更利^[132—133]。此外,植被碳汇、土壤碳汇和岩溶碳汇是一个有机整体,撂荒生态恢复过程中植被、土壤的变化一定程度上影响着岩溶碳汇。有研究表明,中国西南喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇通量与植被覆盖度呈正相关关系^[134]。植被恢复根系分泌的有机酸除了可以影响土壤养分有效性、微生物活性来调节植被和土壤固碳增汇能力^[135—136],还能与表层岩溶带的基岩进一步反应促进岩溶碳汇^[137]。综上所述,耕地撂荒后植被恢复、土壤理化性质改善有利于西南喀斯特地区的植被、土壤和岩溶碳汇。但是喀斯特地区土壤的空间格局决定了植被的碳密度分布,SOC 积累的同时还受到水土流失的威胁,所以喀斯特石漠化区的水土保持工作也是一条有效的碳汇途径。目前,喀斯特地区撂荒地的碳汇研究主要集中于单一的土壤碳汇,撂荒地相关的植被碳汇和岩溶碳汇十分匮乏,需要相关研究者加大对该方面的投入。

3 研究不足与展望

当前西南喀斯特地区撂荒地研究主要集中在耕地撂荒对景观格局、土壤肥力、土壤侵蚀和碳汇等生态环境方面的影响,研究结果有助于认识喀斯特地区耕地撂荒的生态环境效应,对该区域合理规划耕地用途提供了一定的理论参考。然而,基于特殊地表和地下二元结构的喀斯特地区撂荒地研究还有所不足。存在的主要问题为:

(1) 隐性撂荒形式、鉴定方法和环境效应不明确

粗放经营的隐性撂荒可能是现代石漠化发展的潜在动力。然而,隐性撂荒与休耕之间容易混淆,导致隐性撂荒的鉴定相对困难,针对喀斯特地区隐性撂荒的具体发生形式、造成的生态环境影响研究仍处于空白。因此,今后需要完善喀斯特地区隐性撂荒调查的技术方法,在掌握其粗放经营的具体行为基础之上,可通过原位监测或者室内模拟控制试验明确隐性撂荒的具体影响,以便为耕地资源充分利用提供理论支撑。

(2) 耕地撂荒趋势预测和石漠化治理贡献评价

地块破碎,山区气候原因导致高清影像获取困难是西南喀斯特地区撂荒地遥感监测的限制因素。因此,未来亟需针对西南喀斯特地区开发更高精度的撂荒地遥感调查方法,整合多时相、多来源遥感数据动态掌握撂荒地的趋势变化,其中识别石漠化耕地和优等地的撂荒面积对维护喀斯特地区的粮食安全至关重要。而耕地的石漠化程度与喀斯特撂荒地分布呈正相关关系,所以耕地的石漠化程度监测也是撂荒地趋势预测的关键。耕地撂荒后植被的正向演替增加了植被覆盖率,降低了土壤侵蚀强度,促进了石漠化区的生态恢复。后续研究可从大区域上评价显性撂荒对石漠化生态恢复的贡献,从而为石漠化治理方案设计和退耕还林方针策略提供科学指导。

(3) 土壤水分变化的生态影响和养分的限制因素识别

土壤水分亏缺是喀斯特地区植被恢复重建的关键限制因子,耕地撂荒植被恢复有助于土壤水源涵养。但是当前学者多集中于地块尺度撂荒后不同演替群落中的土壤水分变化及其影响因子研究,今后应该从更大尺度的坡面或者小流域角度辨析撂荒地生态系统水源涵养功能的影响。撂荒前期土壤养分的限制因素(比如氮、磷)不尽相同,不同等级石漠化土壤养分的异质性可能是造成该现象的潜在原因,未来还需进一步明确撂荒前期土壤养分的限制因素以便人工干预促进生态恢复,而不是一味的直接撂荒。同时,演替后期是否还受到相关限制作用也需要进一步探讨。

(4) 碳汇综合效应探究

喀斯特地区撂荒耕地土壤的空间格局决定了植被的碳密度分布,植被促进 SOC 积累的同时还受到水土流失的威胁,因此今后还需加强水土流失在撂荒地碳汇中的影响机制研究。此外,当前喀斯特撂荒地的碳汇研究主要集中于单一的土壤碳汇研究,不同撂荒时间、不同演替群落下植被、土壤、岩溶碳汇的综合效应更是今后研究的重点。

(5) 撂荒地复耕的区域选择

目前,国家倡导撂荒地复耕,喀斯特地区那些区域适合复耕,相应的水土保持措施如何布设等政策方案尚不明确。后续应结合耕地撂荒前石漠化程度、坡度、土层厚度等客观因素,依据撂荒地生态恢复程度以及撂荒复耕过程的产沙产流特征等进一步判断撂荒地复耕的生态环境效应利弊,防止耕地的“二次石漠化”。

4 结论

西南喀斯特地区不是传统的粮食主产区,但大面积坡地耕作后水土流失造成的石漠化却严重影响人们的生产生活。因此,为了提高喀斯特地区的农业综合生产能力,应该进一步明确隐性撂荒的生态环境影响,监测优等地和石漠化耕地的撂荒面积及发展趋势,定量耕地撂荒对喀斯特石漠化区土壤肥力恢复、植被覆盖率增加和水土流失防治中的贡献,重视撂荒地的碳汇效应综合评价,从而为重新定位优等地和石漠化坡地的耕地用途提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Díaz G I, Nahuellual L, Echeverría C, Marín S. Drivers of land abandonment in Southern Chile and implications for landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 99(3/4): 207-217.
- [2] Han Z, Song W. Spatiotemporal variations in cropland abandonment in the Guizhou-Guangxi Karst Mountain area, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117888.
- [3] 李广泳,姜广辉,张永红,刘小龙,陈淑娟. 我国耕地撂荒机理及盘活对策研究. *中国国土资源经济*, 2021, 34(2): 36-41.
- [4] 李秀彬. 农地利用变化假说与相关的环境效应命题. *地球科学进展*, 2008, 23(11): 1124-1129.
- [5] 杨通,郭旭东,于潇,韩圣其,刘智丽. 撂荒地监测方法与生态影响述评. *生态环境学报*, 2020, 29(8): 1683-1692.
- [6] 张英,李秀彬,宋伟,史铁丑. 重庆市武隆县农地流转下农业劳动力对耕地撂荒的不同尺度影响. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 552-560.
- [7] 孔祥斌. 当前耕地保护面临的问题分析及对策研究. *中国土地*, 2020(12): 4-7.
- [8] Zhang Y, Li X B, Song W. Determinants of cropland abandonment at the parcel, household and village levels in mountain areas of China: a multi-level analysis. *Land Use Policy*, 2014, 41: 186-192.
- [9] 罗旭玲,王世杰,白晓永,谭秋,冉晨,陈欢,刁慧鹏,陈飞,操玥,吴路华,李汇文,钟昕. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 680-693.
- [10] 陈洪松,王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究. *农业现代化研究*, 2008, 29(6): 734-738.
- [11] 陈慧琳. 南方岩溶区人地系统的基本地域分异探讨. *地理研究*, 2000, 19(1): 73-79.
- [12] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 120-126.
- [13] Zeng F M, Jiang Z C, Shen L N, Chen W, Yang Q Y, Zhang C. Assessment of multiple and interacting modes of soil loss in the Karst critical zone, Southwest China (SWC). *Geomorphology*, 2018, 322: 97-106.
- [14] Ferlan M, Alberti G, Eler K, Batič F, Peressotti A, Miglietta F, Zaldei A, Simončič P, Vodnik D. Comparing carbon fluxes between different

- stages of secondary succession of a Karst grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1/2): 199-207.
- [15] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [16] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 29-32, 79.
- [17] 熊康宁, 陈起伟. 基于生态综合治理的石漠化演变规律与趋势讨论. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 267-273.
- [18] 曾馥平, 王克林, 宋同清. 喀斯特山区火灾迹地自然与人工恢复效益. *山地学报*, 2004, 22(6): 693-697.
- [19] 伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 王克林, 张伟, 邹冬生. 典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应. *中国生态农业学报: 中英文*, 2020, 28(3): 429-437.
- [20] 谭术魁. 耕地撂荒程度描述、可持续性评判指标体系及其模式. *中国土地科学*, 2003, 17(6): 3-8.
- [21] 张斌, 翟有龙, 徐邓耀, 谌柯. 耕地抛荒的评价指标及应用研究初探. *中国农业资源与区划*, 2003, 24(5): 49-52.
- [22] 张斌, 徐邓耀, 翟有龙, 谌柯. 耕地抛荒的量化评价方法. *贵州农业科学*, 2003, 31(5): 43-44.
- [23] MacDonald D, Crabtree J R, Wiesinger G, Dax T, Stamou N, Fleury P, Lazpita J G, Gibon A. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(1): 47-69.
- [24] Romero-Díaz A, Ruiz-Sinoga J D, Robledano-Aymerich F, Brevik E C, Cerdà A. Ecosystem responses to land abandonment in Western Mediterranean Mountains. *CATENA*, 2017, 149: 824-835.
- [25] Frei T, Derks J, Rodríguez Fernández-Blanco C, Winkel G. Narrating abandoned land: perceptions of natural forest regrowth in Southwestern Europe. *Land Use Policy*, 2020, 99: 105034.
- [26] 李升发, 李秀彬. 耕地撂荒研究进展与展望. *地理学报*, 2016, 71(3): 370-389.
- [27] 杨国永, 许文兴. 耕地抛荒及其治理——文献述评与研究展望. *中国农业大学学报*, 2015, 20(5): 279-288.
- [28] Li S F, Li X B. The mechanism of farmland marginalization in Chinese mountainous areas: evidence from cost and return changes. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(4): 531-548.
- [29] 赵晓丽, 张增祥, 汪潇, 左丽君, 刘斌, 易玲, 徐进勇, 温庆可. 中国近 30a 耕地变化时空特征及其主要原因分析. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 1-11.
- [30] 李升发, 李秀彬, 辛良杰, 谈明洪, 王学, 王仁靖, 蒋敏, 王亚辉. 中国山区耕地撂荒程度及空间分布——基于全国山区抽样调查结果. *资源科学*, 2017, 39(10): 1801-1811.
- [31] 罗拥华. 耕地抛荒必然危及国家粮食安全吗. *现代经济探讨*, 2012(10): 64-69.
- [32] 刘春卉, 聂文静, 赵晓彤, 沈维志. 农村外出务工人员承包地处置方式的区域差异与影响因素——基于社会融入视角. *自然资源学报*, 2022, 37(2): 424-439.
- [33] 王玲玉, 周忠发, 赵馨, 孔杰, 张淑. 基于地块级时序遥感的喀斯特石漠化地区撂荒地时空演变. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 92-99, 107.
- [34] 龙健, 吴求生, 李娟, 廖洪凯, 刘灵飞, 黄博聪, 张菊梅. 贵州茂兰喀斯特森林不同小生境类型对岩石溶蚀的影响. *土壤学报*, 2021, 58(1): 151-161.
- [35] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 王克林, 孟天友, 白晓永. 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.
- [36] 赵龙山, 樊春华, 李开凤. 乡村聚落土壤侵蚀环境与水土流失研究综述. *中国水土保持科学*, 2019, 17(6): 140-147.
- [37] Yang Q Q, Wang K L, Zhang C H, Yue Y M, Tian R C, Fan F D. Spatio-temporal evolution of rocky desertification and its driving forces in Karst areas of Northwestern Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(2): 383-393.
- [38] Chen Q R, Xie H L. Research progress and discoveries related to cultivated land abandonment. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(2): 165-174.
- [39] 史铁丑. 国内外耕地撂荒的过程与影响因素研究进展. *湖北农业科学*, 2020, 59(16): 11-16.
- [40] 葛玉娟, 赵宇鸾. 基于道路网络分析技术的耕地细碎化测度模型改进. *资源科学*, 2019, 41(4): 766-774.
- [41] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望. *地球科学进展*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [42] 李建林, 陈瑜琦, 江清霞, 匡晓宇. 中国耕地破碎化的原因及其对策研究. *农业经济*, 2006(6): 21-23.
- [43] 李赞红, 阎建忠, 花晓波, 辛良杰, 李秀彬. 不同类型农户撂荒及其影响因素研究——以重庆市 12 个典型村为例. *地理研究*, 2014, 33(4): 721-734.
- [44] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 1-8.
- [45] 邹巧云, 陈洪松, 马星宇, 聂云鹏. 基于控水试验的喀斯特出露基岩生境植物水分来源分析. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 759-767.
- [46] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 37-44.
- [47] 赵中秋, 后立胜, 蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨. *地学前缘*, 2006, 13(3): 185-189.

- [48] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
- [49] 贺卫, 李坡. 喀斯特峡谷区工程性缺水原因及解决途径——以贵州省花江峡谷示范区为例. 资源开发与市场, 2010, 26(2): 129-131, 134.
- [50] D'Arrigo A, Franco R L, Benenti G, Paladino E, Falci G. Hidden entanglement in the presence of random telegraph dephasing noise. *Physica Scripta*, 2013, T153: 014014.
- [51] 杨晓红. 贵州省耕地资源现状与可持续利用对策. 贵州农业科学, 2017, 45(9): 129-132.
- [52] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 吴绍洪, 戴尔阜. 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.
- [53] Peng J, Xu Y Q, Zhang R, Xiong K N, Lan A J. Soil erosion monitoring and its implication in a limestone land suffering from rocky desertification in the Huajiang Canyon, Guizhou, Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(3): 831-841.
- [54] Zhao H J, Ma F S, Guo J. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt Karst collapse in Southern China in the first half of 2010. *Natural Hazards*, 2012, 60(3): 1037-1054.
- [55] 张信宝, 王世杰, 白晓永, 陈伟燕, 张思屿. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. 地球与环境, 2013, 41(1): 1-6.
- [56] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [57] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
- [58] 郭贝贝, 方叶林, 周寅康. 农户尺度的耕地撂荒影响因素及空间分异. 资源科学, 2020, 42(4): 696-709.
- [59] 刘春, 杨静, 聂云鹏, 陈洪松, 付智勇. 典型喀斯特小流域水文水化学过程对旱季暴雨的响应. 地球与环境, 2015, 43(4): 386-394.
- [60] 马清欣, 何三林. 对当前农村耕地撂荒和耕地质量下降问题的探讨. 中国农业资源与区划, 2002, 23(4): 19-21.
- [61] 黄映霞, 李衍青, 许小红, 蓝芙宁, 黄靖霞. 耕作方式对溶丘洼地土壤性质影响. 南宁师范大学学报: 自然科学版, 2020, 37(1): 86-90.
- [62] 黄建强, 李录堂. 从农村劳动力视角探析耕地抛荒行为——基于会同县农村的实证研究. 北京理工大学学报: 社会科学版, 2009, 11(6): 42-47.
- [63] 熊祥强, 沈燕, 廖和平. 农村土地抛荒问题的调查与分析——以重庆市忠县三汇镇为例. 安徽农业科学, 2006, 34(11): 2536-2538.
- [64] 李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 王永艳, 王世杰, 谢静, 杨广斌. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究. 生态学报, 2014, 34(9): 2195-2207.
- [65] 苗建青, 谢世友, 袁道先, 蒋勇军. 基于农户—生态经济模型的耕地石漠化人文成因研究——以重庆市南川区为例. 地理研究, 2012, 31(6): 967-979.
- [66] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. 地理研究, 2003, 22(6): 733-741, 811.
- [67] 苗建青. 西南岩溶石漠化地区土地禀赋对农户采用生态农业技术行为的影响研究——基于农户土地利用结构的视角[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [68] 欧阳进良, 宇振荣, 张凤荣. 基于生态经济分区的土壤质量及其变化与农户行为分析. 生态学报, 2003, 23(6): 1147-1155.
- [69] 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.
- [70] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 王安邦. 西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议. 地球与环境, 2007, 35(2): 188-192.
- [71] Rey Benayas J M. Abandonment of agricultural land; an overview of drivers and consequences. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 2007, 2(57): 1-14.
- [72] Zaragoza B, Rabasa A, Rodríguez-Sala J J, Navarro J T, Belda A, Ramón A. Modelling farmland abandonment: a study combining GIS and data mining techniques. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 155: 124-132.
- [73] Vega-García C, Chuvieco E. Applying local measures of spatial heterogeneity to landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes. *Landscape Ecology*, 2006, 21(4): 595-605.
- [74] 何洁, 严友进, 易兴松, 王勇, 戴全厚. 喀斯特地区土壤异质性及其与植物相互作用. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2249-2258.
- [75] 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.
- [76] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生, 刘鸿雁. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055-1062.
- [77] 王玲玉, 陈全, 吴跃, 周忠发, 但雨生. 基于地块级时序 NDVI 的喀斯特山区撂荒地特征精准识别. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 23-31.
- [78] 陈正发, 史东梅, 何伟, 夏建荣, 金慧芳, 姜义宝. 1980—2015年云南坡耕地资源时空分布及演变特征分析. 农业工程学报, 2019, 35(15): 256-265.
- [79] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 周德全. 贵州省岩溶地区坡度与土地石漠化空间相关分析. 水土保持通报, 2006, 26(4): 82-86.
- [80] 喻理飞, 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 熊志斌. 退化喀斯特群落自然恢复过程研究——自然恢复演替系列. 山地农业生物学报, 1998, 17(2): 71-77, 86.

- [81] 万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展. 地球科学进展, 2003, 18(3): 447-453.
- [82] 喻理飞, 朱守谦, 祝小科, 谢双喜. 退化喀斯特森林恢复评价和修复技术. 贵州科学, 2002, 20(1): 7-13.
- [83] 祝小科, 朱守谦. 喀斯特石质山地封山育林效果分析. 林业科技, 2001, 26(6): 1-4.
- [84] 徐倩, 李珊珊, 李阳兵, 王萌萌, 黄娟, 余燕群. 岩溶山地撂荒地演变研究——以郎溪槽谷区为例. 地球与环境, 2021, 49(1): 59-72.
- [85] 李阳兵, 罗光杰, 黄娟. 茂兰喀斯特自然保护区撂荒地时空演变、机制及其植被恢复. 中国岩溶, 2017, 36(4): 447-453.
- [86] An Y, Gao Y, Liu X H, Tong S Z. Interactions of soil moisture and plant community properties in meadows restored from abandoned farmlands on the Sanjiang Plain, China. *Community Ecology*, 2019, 20(1): 20-27.
- [87] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.
- [88] Lan J C, Hu N, Fu W L. Soil carbon-nitrogen coupled accumulation following the natural vegetation restoration of abandoned farmlands in a Karst rocky desertification region. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106033.
- [89] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 汪阳春, 何永彬. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
- [90] 张继光, 苏以荣, 陈洪松, 张伟. 桂西北喀斯特区域土壤水分动态变化研究. 水土保持通报, 2007, 27(5): 32-36.
- [91] 傅伟, 陈洪松, 王克林. 喀斯特坡地不同土地利用类型土壤水分差异性研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 59-62.
- [92] 田涟祯, 周忠发, 闫利会. 人为干预下喀斯特峡谷区不同土地利用类型对土壤理化性质的影响. 水土保持通报, 2015, 35(6): 92-96.
- [93] 李亚锦, 郑景明, 王根柱, 周金星, 刘玉国, 哈文秀. 喀斯特区天然林不同演替阶段功能性状特征及其影响因素研究——以云南大黑山为例. 地球学报, 2021, 42(3): 397-406.
- [94] 谭玉兰, 杨丰, 陈超, 莫本田, 郝俊, 周丽. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量的影响. 西南农业学报, 2019, 32(5): 1133-1138.
- [95] 程汉亭, 李勤奋, 王晓敏, 卢天禹, 张显波. 不同植被恢复策略对贵州喀斯特生态系统土壤渗透特性的影响. 水土保持学报, 2020, 34(6): 110-116.
- [96] 周忠发, 田涟祯, 殷超, 闫利会, 陈全. 人为干预下喀斯特峰丛盆地地区不同土地利用类型的土壤理化性质. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2017, 35(4): 1-6, 30.
- [97] 雷洁, 张国明, 刘连友, 杨岩岩, 屈志强, 温海明, 戴佳栋. 土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(4): 486-492.
- [98] 陈晨, 杨苑君, 陈奇伯, 尹捷. 典型石漠化区土壤理化性质对其抗剪性能的影响. 西部林业科学, 2020, 49(2): 91-98.
- [99] Li R, Wu Q L, Zhang J J, Wen Y Q, Li Q G. Effects of land use change of sloping farmland on characteristic of soil erosion resistance in typical Karst mountainous areas of southwestern China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, 28(4): 2707-2716.
- [100] 任晓东, 陈居田, 朱利霞. 长期不同耕作条件下土壤团聚体特征. 宁德师范学院学报: 自然科学版, 2020, 32(4): 429-434, 448.
- [101] 曾茹冰, 黄渐佳, 魏玉杰, 王迪, 蔡崇法. 耕地撂荒对土壤结构及有机碳的影响. 中国水土保持科学, 2020, 18(5): 26-34.
- [102] 陈佳, 陈洪松, 冯腾, 王克林, 张伟. 桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 105-110.
- [103] Deiss L, Sall A, Demyan M S, Culman S W. Does crop rotation affect soil organic matter stratification in tillage systems? *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104932.
- [104] Hu P L, Liu S J, Ye Y Y, Zhang W, He X Y, Su Y R, Wang K L. Soil carbon and nitrogen accumulation following agricultural abandonment in a subtropical Karst region. *Applied Soil Ecology*, 2018, 132: 169-178.
- [105] 赵楚, 盛茂银, 白义鑫, 刘树西. 喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤氮磷有效性及其环境影响因子. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1383-1392.
- [106] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎, 刘炆. 抛荒土地不同处理及利用方式对喀斯特地区土壤微生物的影响. 农业工程学报, 2013, 29(23): 202-210.
- [107] Guo Y, Abdalla M, Espenberg M, Hastings A, Hallett P, Smith P. A systematic analysis and review of the impacts of afforestation on soil quality indicators as modified by climate zone, forest type and age. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143824.
- [108] Chen H J, Peng W X, Du H, Song T Q, Zeng F P, Wang F. Effect of different grain for green approaches on soil bacterial community in a Karst region. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 577242.
- [109] Li D D, Zhang X Y, Dungait J A J, Green S M, Wen X F, Quine T A, Wang Q B. Main controls on the denitrification rates during cropland revegetation in the southwest China Karst Critical Zone Observatory. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107228.
- [110] Guo Z M, Zhang X Y, Green S M, Dungait J A J, Wen X F, Quine T A. Soil enzyme activity and stoichiometry along a gradient of vegetation restoration at the Karst Critical Zone Observatory in Southwest China. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(16): 1916-1927.
- [111] 孙建, 刘子琦, 朱大运, 李渊, 李开萍, 王进. 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价. 水土保持研究, 2019, 26(5): 222-228.
- [112] 王进, 刘子琦, 张国, 李渊, 李开萍, 鲍恩侯. 喀斯特石漠化治理不同恢复模式土壤养分分布特征——以贵州花江示范区为例. 西南农

- 业学报, 2019, 32(7): 1578-1585.
- [113] 白义鑫, 盛茂银, 肖海龙, 胡琪娟. 典型石漠化治理措施对土壤有机碳、氮及组分的影响. 水土保持学报, 2020, 34(1): 170-177, 185.
- [114] Robledano-Aymerich F, Romero-Díaz A, Belmonte-Serrato F, Zapata-Pérez V M, Martínez-Hernández C, Martínez-López V. Ecogeomorphological consequences of land abandonment in semiarid Mediterranean areas: integrated assessment of physical evolution and biodiversity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 222-242.
- [115] 闫伟. 亚热带白云岩喀斯特区不同土地利用下成土速率与土壤侵蚀特征模拟研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- [116] 李瑞, 刘瑞禄, 吕涛, 李勇, 刘云芳, 杜迪. 贵州省喀斯特地区典型小流域不同种植模式坡面径流产沙研究. 水土保持通报, 2012, 32(5): 132-135.
- [117] 曾馥平, 王克林. 桂西北喀斯特地区 6 种退耕还林(草)模式的效应. 农村生态环境, 2005, 21(2): 18-22.
- [118] 李华林, 高华端, 杨涛, 高儒学, 孙泉忠. 凯掌喀斯特小流域不同植被措施的减沙功能. 浙江农林大学学报, 2017, 34(4): 687-694.
- [119] 蓝家程, 肖时珍. 岩溶区土地利用变化对土壤有机碳与岩溶碳汇的影响研究进展. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2633-2640.
- [120] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 王静, 岳跃民. 生态恢复对桂西北典型喀斯特区植被碳储量的影响. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2288-2295.
- [121] 杨龙. 喀斯特石漠化治理生态修复模式下的碳汇效益监测评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- [122] Wang Y W, Luo W J, Zeng G N, Peng H J, Cheng A Y, Zhang L, Cai X L, Chen J, Lyu Y N, Yang H L, Wang S J. Characteristics of carbon, water, and energy fluxes on abandoned farmland revealed by critical zone observation in the Karst region of southwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106821.
- [123] Wang M M, Chen H S, Zhang W, Wang K L. Soil organic carbon stock and its changes in a typical Karst area from 1983 to 2015. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(1): 42-51.
- [124] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘灵飞. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响. 环境科学, 2014, 35(1): 240-247.
- [125] 邵晗, 王虎, 王妍, 徐红枫, 苏倩, 刘云根. 岩溶石漠化地区不同利用方式对土壤肥力和重金属质量分数的影响. 浙江农林大学学报, 2022: 1-9.
- [126] Chen H S, Zhang W, Wang K L, Hou Y. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in Karst and non-Karst areas of northwest Guangxi, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(5): 1086-1093.
- [127] 林立文. 喀斯特区植被恢复对土壤有机质组分及团聚体稳定性的影响: 广西大学, 2021.
- [128] Li Y X, Yu P J, Shen L C. Changes in soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon during old-field succession in Karst valley. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 194(1): 15.
- [129] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of soil aggregate stability on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 3809.
- [130] 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响. 环境科学, 2021: 1-16.
- [131] Liu M, Han G L, Zhang Q. Effects of agricultural abandonment on soil aggregation, soil organic carbon storage and stabilization: results from observation in a small Karst catchment, Southwest China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 288: 106719.
- [132] 张岚峰. 鄂西南喀斯特地区植被恢复后土壤性质变化及其影响因素研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2021.
- [133] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 苏以荣. 桂西北典型喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的固碳效益评价. 生态学报, 2016, 36(17): 5528-5536.
- [134] 李汇文, 王世杰, 白晓永, 操玥, 田义超, 罗光杰, 陈飞, 李琴, 吴路华, 王金凤, 王明明, 田诗琪, 邓元红, 胡泽银, 杨钰杰, 李朝君, 路茜, 习慧鹏, 陈欢, 冉晨, 罗旭玲. 气候变化及生态恢复对喀斯特槽谷碳酸盐岩风化碳汇的影响评估. 生态学报, 2019, 39(16): 6158-6172.
- [135] 曹建华, 蒋忠诚, 袁道先, 夏日元, 章程. 岩溶动力系统与全球变化研究进展. 中国地质, 2017, 44(5): 874-900.
- [136] 赵宽, 吴沿友. 根系分泌的有机酸及其对喀斯特植物、土壤碳汇的影响. 中国岩溶, 2011, 30(4): 466-471.
- [137] 曾发明. 岩溶石漠化治理对碳汇的影响研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.