

引用格式:

甘琦琳, 尹新雅, 赵国政, 王林均, 彭韬. 喀斯特山地不同密度林鸡复合系统对表层土壤和林下植被的影响研究 [J]. 农业现代化研究, 2021, 42(5): 964-974.

Gan Q L, Yin X Y, Zhao G Z, Wang L J, Peng T. Effects of forest chicken complex system with different densities on topsoil and understory vegetation in karst mountains[J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(5): 964-974.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2021.0097



喀斯特山地不同密度林鸡复合系统对表层土壤和林下植被的影响研究

甘琦琳^{1,2,3}, 尹新雅¹, 赵国政^{1,2,3}, 王林均¹, 彭韬^{2,3*}

(1. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 安顺 562199)

摘要: 林鸡复合经营作为创新农作模式之一, 具有生态经济效益好的优点, 但养殖户生态环境保护意识不强, 缺乏科学理念指导, 片面追求最大经济效益, 使得林下养殖对脆弱的喀斯特山地生态环境造成较大不利影响。因此, 本研究通过设置密度梯度试验, 分析 600 只/hm² (T1)、1 200 只/hm² (T2)、2 400 只/hm² (T3) 3 类养鸡密度对林下表层土壤质量及植被的影响, 综合考虑生态经济价值, 以确定喀斯特山地林下生态养鸡合理养殖密度。经 4 个月的养殖试验表明: 1) T1、T2 处理土壤饱和和导水率变大, 最大持水量上升, 但土壤容重与孔隙度变化不明显; T3 处理土壤饱和和导水率下降、孔隙度降低, 土壤出现较为明显的板结现象。2) 各处理全氮 (TN)、土壤有机碳 (SOC) 养分含量较养殖前均出现不同程度的增加, 呈先升后降趋势, 在 T2 处理时养分含量最高, 分别提升了 69.0% 和 89.3%; 全磷 (TP)、全钾 (TK) 养分含量总体呈上升趋势, 随养殖密度增大而增加, 在 T3 处理时, 养分含量分别提升了 29.3% 和 36.8%。3) 各处理草本植被生物量平均减少程度均超过 95%。养殖结束自然恢复 4 个月后, T1、T2 和 T3 处理草本植被生物量较养殖前恢复比分别为 41.2%、3.5%、1.5%。4) T1、T2 和 T3 各处理养鸡收益分别为 7.2、14.4 和 28.8 万元/(hm²·a)。综合以上结果认为, 喀斯特山地林鸡复合系统的合理密度应控制在 600 只/hm², 同时划分禁牧区与轮牧区, 能够提升土壤质量和保护植被多样性, 兼顾生态效益和经济效益, 实现山地农业的可持续绿色发展。

关键词: 林下生态养鸡; 土壤养分; 林下植被; 喀斯特山地; 生态经济效益

中图分类号: S759.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0275 (2021) 05-0964-11

Effects of forest chicken complex system with different densities on topsoil and understory vegetation in karst mountains

GAN Qi-lin^{1,2,3}, YIN Xin-ya¹, ZHAO Guo-zheng^{1,2,3}, WANG Lin-jun¹, PENG Tao^{2,3}

(1. College of Eco-Environment Engineering, Guizhou Minzu University, Guizhou, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guizhou, Guiyang, 550081, China; 3. Puding Karst Ecosystem Observation Research Station, Chinese Academy of Sciences, Guizhou, Anshun, 562199, China)

Abstract: As one of the innovative agricultural modes of Compound Management of Forest and Poultry, forests ecological chicken brood has high ecological and economic benefits. However, in pursuit of maximum economic benefits, farmers often ignore ecological environmental protection, resulting in a negative impact on karst region with fragile ecological environment. Therefore, this study analyzed the effects of 600 chickens/hm² (T1), 1 200 chickens/hm² (T2) and 2 400 chickens/hm² (T3) on the surface soil and vegetation under the forest, and comprehensively considered the ecological and economic value to determine the reasonable poultry-raising density of under-forest economy in karst mountain area. After four months of poultry-raising experiment, the results showed that: 1) Under T1 and T2 poultry-raising conditions, saturated hydraulic conductivity and maximum moisture capacity of the soil increased, but the change

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502602); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)区域重点项目(KFJ-STQYD-2021-24-001)。

作者简介: 甘琦琳(1995—), 男, 四川邻水人, 硕士研究生, 主要研究方向为农村生态环境保护工程, E-mail: ganqilin3918@163.com;

通信作者: 彭韬(1984—), 男, 博士, 研究员, 主要从事喀斯特生态环境地球化学研究, E-mail: pengtao@vip.gyig.ac.cn。

收稿日期: 2021-03-14; 接受日期: 2021-05-12

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2016YFC0502602); Science and Technology Service Network Initiative, Regional Key Program (KFJ-STQYD-2021-24-001).

Corresponding author: PENG Tao, E-mail: pengtao@vip.gyig.ac.cn.

Received 14 March, 2021; Accepted 12 May, 2021

of soil bulk density and porosity is not obvious. Under T3 condition, the saturated hydraulic conductivity and porosity of soil decreased, and the soil appeared obvious hardening phenomenon. 2) The contents of soil total nitrogen and soil organic carbon in all conditions increased compared with those before poultry-raising, with the largest increment at T2 condition, increased by 69.0% and 89.3% respectively. The contents of total phosphorus and total potassium in soil increased with the poultry-raising density, which increased by 29.3 % and 36.8 % respectively under T3. 3) The biomass of herbaceous vegetation decreased by more than 95% under all conditions. Four months after stopping poultry-raising, the biomass of herbaceous vegetation in T1, T2 and T3 conditions recovered to 41.2%, 3.5% and 1.5% of that before poultry-raising, respectively. 4) The chicken raising income of T1, T2 and T3 conditions were 72 000, 144 000 and 288 000 RMB per hectare per year respectively. Based on the above results, the density of forests ecological chicken brood in karst mountainous area should be controlled within 600 chickens/hm², and the forbidden grazing area and rotational grazing area should be divided, which can improve soil quality and protect vegetation diversity, take into account economic and ecological benefits, and achieve sustainable green development of mountain agriculture.

Key words : understory ecological chicken raising; soil nutrients; understory vegetation; karst mountain area; ecological economic benefits

林下经济由林下复合经营发展而来,以林地资源和森林生态环境为依托,发展林下种植业、养殖业、采集业和森林旅游业^[1],具有提高单位面积产出的作用。合理地利用林下土地资源,发展立体经济是推动山区乡村振兴的重要手段。2019年3月,国家林业和草原局办公室关于公布国家林下经济示范基地名单的通知,促进了林下经济在全国各地的蓬勃发展,取得了显著成效。国家林业和草原局2020年12月6日发布称,我国有15个省份的林下经济产值超过100亿元,有9个省份产值达500亿元以上,江西、广西甚至超过1000亿元。

贵州作为典型的山地农业省,随着大规模退耕还林还草的实施,林下复合经营取得了一定成效。如2010年,贵州桐梓创新发展庭院型林下经济、林-菌、林-药、林下珍禽养殖、林-农等多种模式取得一定成效^[2]。2015年贵州省都匀林禽模式发展土鸡养殖,效益达3.1万元/(hm²·a)^[3]。但从全国范围看,贵州山区林下经济发展仍然相对滞后,主要原因与受限于贵州独特的喀斯特山区地质背景条件和脆弱的生态环境有密切关系。贵州是我国唯一没有平原支撑的省份,山地面积占全省总面积的92.5%,其中15°以上坡地占全省面积的69.4%^[4],加上人多地少、人地矛盾突出^[5],因此山地农业是贵州农业发展的重要形式。然而,贵州喀斯特地区占山区面积的64%^[6],成土速率低、土层浅薄、基岩裸露、土壤总量少、环境承载力相对较弱,环境空间容量小^[7]。不合理的陡坡开垦、樵采、过度放牧等人类活动导致喀斯特山区土壤侵蚀、土地质量退化和石漠化等生态环境问题^[6,8]。此外,喀斯特坡地土-石直接突变接触、岩层孔隙和孔洞发育^[9-12]的地表、地下二元水文地质结构特点,使得一般性降雨难以形成径流^[13],雨水入渗作用强烈^[14],土壤水分、养分和污染物极易通过岩石裂隙进入地下

暗河,不但可造成喀斯特坡地土壤“缺水”和“缺肥”问题,也极易在肥料管理不当情况下造成地下水污染^[15]以及生态景观破坏等其他一系列问题。因此,贵州喀斯特山地农业发展不能照搬套用平原农业模式,发展适宜于喀斯特山地的生态农业模式十分必要。

在脆弱的喀斯特生态地质背景与人地矛盾尖锐的双重不利条件下,更需要以“两山论”为指导,以深化“生态优先”和“绿色发展”的理念为指引^[16],在优先保证生态效益的基础上,获得较好的经济效益,践行“既要绿水青山,又要金山银山”的发展路线,林下经济因此也迎来了科学发展机遇。而林下经济的发展需要科学审慎的对待,林下生态养鸡作为林禽复合经营系统创新农作模式之一,近年来发展迅速,产生了可观的经济和社会效益^[17]。但目前山区养殖技术仍停留在以传统散养技术同现代饲养技术初步相结合的养殖基础上,主要关注鸡肉的品质、口感以及其带来的经济效益^[18-19],几乎未考虑对林下生态环境和土壤的影响,导致该模式实施的可持续性存在一定问题。根据实地调研发现,养殖公司、企业与个体户为片面追求经济效益,养殖密度高达3000只/hm²,明显存在高密度养殖,忽视生态效益等问题。高密度养殖会压缩多年生植物的生存空间^[20],导致生态质量退化^[21],对水环境也存在负面影响^[22],同时过高密度的林下散养也存在环境污染风险。但在喀斯特退耕山地上要获得良好的经济效益,必须构建林下复合经营生态系统^[23]。因此,为保护林下生态环境的健康发展,明确喀斯特山地林鸡复合系统的最佳养殖密度,建立适合在贵州典型喀斯特山地发展的林鸡复合经营模式,是解决林下养鸡过度放牧忽视生态效益的关键路径,然而相关研究仍较薄弱。

本研究选取喀斯特典型石灰岩山地设立三种不

同养殖密度的林下养殖(鸡)样地。通过研究养殖前后与恢复期(养殖后 4 个月)林下生态环境中草本植被生物量和生物多样性、表层土壤理化性质的变化,分析不同林下养殖对表层土壤和林下植被的影响,并结合市场价值法,对比计算林鸡复合模式的经济生态效益,确定喀斯特山区林鸡复合系统的合理养殖密度,促进贵州喀斯特山地林下生态养殖的绿色可持续发展,为提高喀斯特山地单位面积经济林地价值提供科学依据,同时也对于稳固脱贫攻坚成果,助力乡村振兴发展具有一定的积极意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于黔中高原典型喀斯特地区的中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站(26°22'30"N, 105°44'26"E)内,该区海拔在 1 056.6~1 140.8 m 之间,属于亚热带季风湿润气候,全年气候温和,年平均气温 15.1 °C,年平均日照时数 1 164.9 h,无霜期 301 d,年平均降水 1 378.2 mm,土壤类型为黄色和棕色石灰土,自然植被类型为亚热带常绿落叶阔叶混交林^[1],天然林分主要有杉,次为松、楸、椿、白杨等。试验地树种为桃树(*Prunus persica*),草本植被以白花鬼针草(*Bidens pilosa*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、喀西茄(*Solanum khasianum*)、苘草(*Arthraxon hispidus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)为主。

1.2 研究方法

1.2.1 野外试验设计 在试验林地以尼龙网作为围栏,以 11 m×6 m 等面积划分四块试验样地,分别设置 3 个不同养殖密度样地(T1、T2、T3)和 1 个对照组(CK)。因喀斯特地区存在土壤景观的异质性问题,本次研究选取同一坡地岩土结构和种植桃树树龄(5 a)接近的样地作为观测样地,且样地面积均较大(66 m²),在各样地内设立重复的三个观测样方(1 m×1 m)进行林下植被和表层土壤性质观测。养殖密度由文献阅读和实地调研确定,CK 对照样地养鸡密度为 0 只/hm²,T1、T2、T3 养鸡密度分别是 600、1 200、2 400 只/hm²。T1 处理属于一个相对较低的密度,T3 处理是调研时大多数养殖户为追求经济效益在林下养鸡时实际密度的一个均值,由于 T1 与 T3 处理密度相差较大,故增设 T2 处理以作对比。试验选用 60 d 鸡龄南丹瑶鸡进入试验区。养殖依据全进全出原则,为使饲养时间与经济价值最优化,将养殖时间确定为 2020 年 6 月至 2020 年 10 月,即 4 个月为一个周期。期间不论自然或非自然因素死亡均采取同龄鸡补养措施,

确保养殖试验密度不变。2020 年 11 月至 2021 年 2 月为场地植被恢复观察期。

1.2.2 样品采集与测定 试验前,对不同密度养鸡样地和对照样地的植被和表层土壤进行调查。植被调查内容包括草本生物量和多样性,每个样地随机挑选 1 m×1 m 标准样方进行草本调查,样方共 15 块,对样地中的草本植物多样性、生物量进行测定,养殖结束后,再次进行植被多样性及生物量测定。表层土壤考虑到喀斯特山区土层浅薄,表土取样深度为 0~10 cm,分为表层 0~5 cm、底层 5~10 cm,共 2 层。对对照样地(0 只/hm²)上下 2 层,每层各取 3 个重复样,其余处理上下 2 层各取 9 个重复样,共采集 60 个样品。剔除土壤里的砂砾、根系和动物残体等杂物,自然风干后研磨过 10 目和 100 目筛,保存备用。全氮(TN)、土壤有机碳(SOC)等指标分析通过 CHNS 元素分析仪(德国 Elementar 公司)按元素分析法完成测定;全磷(TP)、全钾(TK)等指标分别利用紫外分光光度计、火焰光度计等仪器按酸熔法完成测定。

1.2.3 数据处理与分析 运用描述性统计分析获得各处理土壤理化性质的最大值、最小值、平均值和标准差;采用单因素方差分析方法-Duncan 法,置信度为 95%,检验不同林下养鸡密度下土壤理化性质的差异显著性。

生态经济价值按市场价值法计算不同密度林鸡复合经营模式价值,这是根据林下养鸡生态系统所提供的各种产品的产量、市场价格及其生产成本来核算的。计算公式为:

$$V_f = \sum_{i=1}^m Y_{f,i} \times (P_{f,i} - C_{f,i}) \quad (1)$$

式中: V_f 为林下经济产品纯利润(元/a); $Y_{f,i}$ 为第 i 类林下经济产品总产量(kg/a); $P_{f,i}$ 为 i 类产品价格(元/kg); $C_{f,i}$ 为 i 类产品成本(元/kg); m 为产品种类。林下经济产品参考当地市场价格。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质变化

2.1.1 土壤物理性质变化 土壤容重、饱和导水率、最大持水量、毛管持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度以及孔隙度是衡量土壤质量和持水能力的重要指标。各样地养殖前,所测表层土壤中 0~5 cm 土层土壤容重、最大持水量、孔隙度变化范围分别为 1.03~1.09 g/cm³、50.7%~56.0%、55.4%~56.8%, 5~10 cm 土层土壤容重、最大持水量、孔隙度变化范

围分别为 1.17~1.21 g/cm³、42.0%~44.0%、50.8%~52.3%。养殖结束后，不同养殖密度下的土壤物理性质变化特征如表 1 所示。测定结果表明，T1、T2 处理较养殖前土壤容重变化不明显，但在 T3 处理土壤容重显著增加。养殖前、CK、T1、T2 处理与 T3 处理之间土壤容重差异显著。各养殖处理土壤容重均值较养殖前其变化幅度分别为 -6.6%、-14.0%、11.3%，说明中低密度条件下鸡的活动会使表层土壤变得松散，高密度条件下会使土壤质地紧实。

饱和导水率总体呈现先升后降的趋势（表 1），其中 0~5 cm 土层饱和导水率在 T1 处理达到最大，CK、T2、T3 处理与 T1 处理饱和导水率差异显著。5~10 cm 土层饱和导水率在 T2 处理达到最大，T1、T2、T3 处理均大于 CK 处理，CK、T3 处理与 T2

处理饱和导水率差异显著。各养殖处理饱和导水率均值较养殖前其变化幅度分别为 562.1%、513.5% 和 33.9%。主要原因可能是随着鸡养殖密度的变化，刨食和踩踏关系也发生变化。鸡对土壤环境的影响，主要表现在刨食、踩踏以及鸡粪补给几个方面。T1 处理中，鸡对土壤的作用以刨食、鸡粪补给为主导，使土壤质地疏松，饱和导水率显著上升，起到了松土剂的效果；T2 处理中，鸡对土壤的作用仍以刨食、鸡粪补给为主导，但踩踏能力得到增强，饱和导水率呈现由 0~5 cm 向 5~10 cm 转化的趋势，对土壤物理性质的影响仍以促进作用为主；T3 处理中，鸡对土壤的作用以踩踏为主导，刨食作用、鸡粪补给作用减弱，使得土壤容重增加，饱和导水率下降，总孔隙度变小，土壤发生板结。

表 1 不同养殖密度土壤物理性质的变化

Table 1 Changes in physical properties of soils with different breeding densities

处理	养殖密度 (只/hm ²)	土层深度 (cm)	土壤容重 (g/cm ³)	饱和导水率 (cm/d)	最大持水量 (%)	毛管持水量 (%)	非毛管孔隙 (%)	毛管孔隙 (%)	孔隙度 (%)
CK	0	0~5	1.05±0.02b	118.67±21.36b	54.1±0.6a	50.9±1.2a	3.4±0.8a	53.6±1.0a	57.1±0.3a
T1	600		1.05±0.10b	763.67±467.64a	48.8±4.6ab	47.8±5.0a	1.1±1.1ab	50.0±2.2a	51.1±1.1a
T2	1200		0.99±0.10b	247.00±188.34b	51.9±12.9ab	51.7±12.9a	0.3±0.1b	50.5±8.7a	50.7±8.7a
T3	2400		1.21±0.05a	78.33±118.56b	40.7±3.6b	40.2±3.7a	0.6±0.3b	48.7±2.7a	49.3±2.6a
CK	0	5~10	1.21±0.02ab	67.00±16.82b	41.7±2.0bc	39.6±2.1bc	2.6±0.1a	47.8±1.8ab	50.4±1.7ab
T1	600		1.07±0.13bc	465.67±562.70ab	49.2±5.5ab	46.3±6.4ab	3.0±4.1a	49.2±5.2ab	52.2±1.1a
T2	1200		0.96±0.06c	892.00±176.23a	58.9±8.7a	57.4±8.8a	1.5±0.6a	54.9±5.3a	56.4±5.1a
T3	2400		1.32±0.10a	170.33±147.96b	34.3±6.4c	33.0±7.0c	1.7±1.3a	43.0±6.0b	44.7±4.9b

注：同一土层同列英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著（ $p<0.05$ ）。

随着养殖密度的增加，最大持水量在 0~5 cm 土层呈波动下降趋势，5~10 cm 呈先升后降的趋势（表 1）。0~5 cm 土层，CK、T3 处理分别与 T1 和 T2 处理之间差异不显著，但 CK、T3 处理之间差异显著。5~10 cm 土层，T2、T3 处理分别与 T1 和 CK 处理之间差异不显著，但 T2、T3 处理之间差异显著。各养殖处理最大持水量较养殖前其变化幅度分别为 1.8%、15.2%、-22.1%。毛管持水量、毛管孔隙与最大持水量变化趋势一致，但非毛管孔隙总体上呈现下降变化趋势。孔隙度在 0~5 cm 土层呈缓慢下降趋势，各处理间差异不显著。5~10 cm 土层呈现先升后降的变化趋势，T1、T2 处理与 T3 处理之间差异显著。各养殖处理孔隙度较养殖前其变化幅度分别为 -4.0%、-0.4%、-12.6%。这说明中低养殖密度对土壤孔隙度影响较小。

2.1.2 土壤化学性质变化 土壤养分方面，不同桃林生态养鸡密度下各土壤层的 TN 含量均值范围为 1.80~3.73 g/kg，T1、T2 和 T3 各处理养分含量较养殖前均值增量百分比分别为 22.3%、69.1% 和 50.7%。TP 含量均值范围为 0.72~1.05 g/kg，各处

理养分含量较养殖前均值增量百分比分别为 1.7%、1.9% 和 25.1%。TK 含量均值范围为 4.28~6.27 g/kg，各处理养分含量较养殖前均值增量百分比分别为 0.8%、18.9% 和 37.4%。SOC 含量均值范围为 17.03~37.56 g/kg，各处理养分含量较养殖前均值增量百分比分别为 20.9%、89.5% 和 61.7%（表 2）。

不同养殖密度下各处理土壤养分含量具体表现为：TN 在表层 0~5 cm 呈先升后降的变化趋势，T2、T3 处理分别与 CK 和 T1 处理差异显著。底层 5~10 cm 与表层变化趋势一致，T1、T2、T3 处理分别与 CK 处理差异显著。TP 在表层 0~5 cm 呈现波动上升趋势，CK 与 T3 处理之间差异显著。底层 5~10 cm 呈现先降后升的变化趋势，各处理间差异均不显著。TK 表层 0~5 cm 呈现逐渐上升趋势，CK 和 T1 处理与 T3 之间差异显著。底层 5~10 cm 呈现先降后升趋势，T3 处理分别与 CK、T1 处理差异显著。SOC 表层 0~5 cm 呈现先升后降趋势，T2 和 T3 处理与 T1 和 CK 处理差异显著。底层 5~10 cm 与表层变化一致，T2 处理与 CK、T3 处理差异显著（表 2）。

表 2 不同养殖密度土壤化学性质的变化

Table 2 Changes of chemical properties of soil at different breeding densities

处理	养殖密度 (只/hm ²)	土层深度 (cm)	全氮 TN (g/kg)	全磷 TP (g/kg)	全钾 TK (g/kg)	土壤有机碳 SOC (g/kg)
CK	0	0~5	2.41±0.03b	0.76±0.30b	4.38±0.97b	18.70±2.67b
T1	600		2.70±0.54b	0.85±0.19ab	4.64±0.75b	23.49±6.34b
T2	1200		3.73±0.30a	0.81±0.09ab	5.00±1.42ab	37.56±2.41a
T3	2400		3.47±0.69a	1.05±0.23a	5.97±0.67a	33.60±7.35a
CK	0	5~10	1.80±0.07c	0.78±0.43a	4.48±1.05b	17.03±4.53b
T1	600		2.38±0.45b	0.72±0.20a	4.28±0.88b	20.27±5.21ab
T2	1200		3.24±0.27a	0.76±0.17a	5.58±1.39ab	32.34±1.87a
T3	2400		2.78±0.45ab	0.85±0.20a	6.27±1.47a	26.00±4.61b

说明：同一土层同列英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 林下植被生物量及物种数变化

不同养殖密度下草本植被的变化如图 1 所示。林下养鸡前 (2020 年 6 月)，林下养鸡试验区域随机采样 15 个，共统计 33 种草本植被。林下养鸡结

束后 (2020 年 10 月)，林下养鸡试验区域随机采样 15 个，共统计 32 种草本植被。各处理区主要物种如表 3 所示。未养殖区域，生物量变化不大，草本植被生物量随时间、季节的变化分别是 1 620.62、

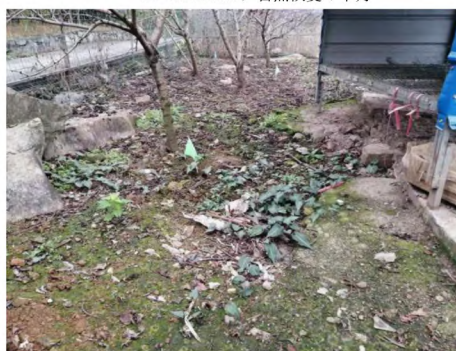
T1 (600 只/hm²) 养殖结束时T1 (600 只/hm²) 自然恢复 4 个月T2 (1 200 只/hm²) 养殖结束时T2 (1 200 只/hm²) 自然恢复 4 个月T3 (2 400 只/hm²) 养殖结束时T3 (2 400 只/hm²) 自然恢复 4 个月

图 1 各处理草本植被实况

Fig. 1 Treatment of herbaceous vegetation

表 3 不同养殖密度下草本植被的变化
Table 3 Changes of herbaceous vegetation under different breeding densities

处理	采样时段	养殖密度 (只/hm ²)	草本植被		
			生物量(干重) (kg/hm ²)	物种数 (种)	主要物种(前3种)
CK	林下养鸡前	0	1620.62±467.23	20±9	白花鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>)、苘草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、艾蒿 (<i>Artemisia argyi</i>) 等
	林下养鸡后		2280.32±1260.22	17±5	苘草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、艾蒿 (<i>Artemisia argyi</i>)、细柄草 (<i>Capillipedium parviflorum</i>) 等
	恢复 4 个月后		2075.09±1146.80	13±4	艾蒿 (<i>Artemisia argyi</i>)、苘草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、白茅 (<i>Imperata cylindrica</i>) 等
T1	林下养鸡前	600	1737.69±267.23	12±2	苘草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、艾蒿 (<i>Artemisia argyi</i>)、白花鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>) 等
	林下养鸡后		84.43±146.24	2±3	牵牛 (<i>Pharbitis nil</i>)、小蓬草 (<i>Conyza canadensis</i>)、少花龙葵 (<i>Solanum photeinocarpum</i>) 等
	恢复 4 个月后		716.16±97.47	10±2	小蓬草 (<i>Conyza canadensis</i>)、芥 (<i>Capsella bursa-pastoris</i>)、猪殃殃 (<i>Galium spurium</i>) 等
T2	林下养鸡前	1 200	2018.19±986.51	10±4	白花鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>)、苘草 (<i>Arthraxon hispidus</i>)、白车轴草 (<i>Trifolium repens</i>) 等
	林下养鸡后		44.37±76.85	1±1	爵床 (<i>Rostellularia procumbens</i>)
	恢复 4 个月后		70.13±56.87	5±3	苦苣菜 (<i>Ixeris polycephala</i>)、小蓬草 (<i>Conyza canadensis</i>)、异叶黄鹌菜 (<i>Youngia heterophylla</i>) 等
T3	林下养鸡前	2 400	1105.99±252.18	5±2	喀西茄 (<i>Solanum khasianum</i>)、豨莶 (<i>Siegesbeckia orientalis</i>)、白花鬼针草 (<i>Bidens pilosa</i>) 等
	林下养鸡后		67.60±117.09	1±2	喀西茄 (<i>Solanum khasianum</i>)、刺苋 (<i>Amaranthus spinosus</i>) (均为外来入侵物种)
	恢复 4 个月后		16.40±10.48	3±2	芥 (<i>Capsella bursa-pastoris</i>)、小蓬草 (<i>Conyza canadensis</i>)、阿拉伯婆婆纳 (<i>Veronica persica</i>) 等

2 280.32、2 075.09 kg/hm² (表 3)。

养殖区域,各处理养殖结束时,600 只/hm² 样地剩余 4 种植物,主要是藤蔓植物,如牵牛 (*Pharbitis nil*),还有少量高大草本植物,草本植被生物量为 84.43 kg/hm²。1 200 只/hm² 样地剩余 1 种植物,为少量爵床 (*Rostellularia procumbens*),草本植被生物量为 44.37 kg/hm²。2 400 只/hm² 样地剩余 2 种植物,其中刺苋 (*Amaranthus spinosus*) 属于国家重点管理外来入侵物种名录第 2 批外来植物,为高大草本植物,喀西茄 (*Solanum khasianum*) 属于第 4 批外来物种,为直立草本至亚灌木植物,两种外来植物生物量为 67.6 kg/hm²,表明在养殖后外来入侵物种在恢复过程中占主导地位。

总体来说,林下养殖对林下植被有显著影响,养殖期间会对林下草本的生长产生明显抑制作用。在养殖区域,600、1 200、2 400 只/hm² 各处理草本植被生物量平均减少程度依次为 95.1%、97.8%、99.9% (外来物种除外),对草本植被物种数破坏程度依次为 83.3%、90%、99.9%。与此同时,不同养殖密度也会影响植被的恢复速率,在养殖结束 4 个月后,各处理样地草本植被生物量分别为 716.16、70.13、16.4 kg/hm²,较养殖前其恢复速率分别为 41.2%、3.5%、1.5%。因此,林下生态养殖须划分轮牧区、休牧区及禁牧区,用以保护植物种子库和

植被景观等。

2.3 喀斯特山地林鸡复合生态经济价值分析

按照市场价值法计算林鸡复合经营的生态经济价值。在桃林下进行生态养鸡时,为保证鸡的安全,未使用农药;同时鸡会产出粪便,也未施用化肥。研究区桃树密度约为 1 200 棵/hm²,1 年 1 熟,价格 2.52 元/kg,产量约 6 500 kg/hm²,桃子经济价值为 1.64 万元/(hm²·a)。鸡在室内养殖 2 个月(按鸡苗购进价格计算),野外养殖 4 个月(按 120 d 计算),共养殖 6 个月,其具体核算清单如表 4 所示。

本研究养殖规模不大,技术简单,无须专人养殖,农民茶余饭后皆可操作,故未考虑人工成本。

表 4 林下复合经营(鸡)经济价值核算指标
Table 4 Index of economic value accounting for composite management (chicken) under forest

属性	单价 (元)	日均 消耗	均重 (kg)	备注
鸡苗	17	-	0.5	鸡苗单位按只数计算
疫苗	15	-	-	疫苗单位按瓶数计算,每瓶可供 500 只鸡使用,不满 500 只的部分按 1 瓶计算
饲料	3	10 只/kg	-	饲料单位按 kg 计算
水费	2.28	1000 只/t	-	用水单位按 t 计算
成鸡	50	-	2.5	成鸡单位按 kg 计算
其他	不定	不定	-	因鸡群感冒使用药品、清洁场所使用消毒水所产生的费用等,按实际花费计算

综合以上指标,计算出养殖成本每只鸡约 65 元,平均每只可盈利 60 元。按照 1 年 2 批的养殖模式进行, T1、T2 和 T3 各处理养鸡收益分别为 7.2、14.4 和 28.8 万元 / ($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。

3 讨论

3.1 不同养殖密度林鸡复合系统对表层土壤的影响

土壤是植物赖以生存的物质基础,良好的土壤物理性质是肥沃土壤的重要标志,土壤的密度、孔隙状况能调节土壤的结构性和通透性^[24]。土壤养分是陆地生态系统中植物营养的主要来源,物种组成、群落结构及生产力均受土壤养分的影响^[25]。自然状态下,土壤中 C、N、P、K 养分的变化主要取决于凋落物的矿化分解与转化累积^[26],土壤保持、维持养分循环功能是重要的生态系统支持服务。但人为干预会改变土壤性质,罗俊等^[27]认为,有机肥可显著降低土壤容重、紧实度、贯入阻力和抗剪强度,提高土壤总孔隙度、通气孔隙度和毛孔孔隙度,而鸡粪是一种比较优质的有机肥。前人研究发现,林下养鸡能改善土壤物理性质,使土壤容重降低,总孔隙度增加^[28-29];但也有研究发现,养鸡后林地土壤容重高于未养鸡前^[18]。本研究中,林下养鸡后, T1、T2 处理样地土壤物理性质除孔隙度变化不明显外,其余各项指标均说明土壤质地优于 CK 处理和养殖前, T3 处理土壤容重显著增高,孔隙度明显减小,土壤紧实度变高。这一结果与前人研究均存在一定差异性,原因可能与研究区地质背景、林地类型、郁闭度和养鸡模式的差异有关。本研究中, T1 处理主要以刨食为主,土壤较为松散; T2 处理受刨食和踩踏的双重影响,土壤较处理 T1 紧实,但较 T3 处理松散; T3 处理主要以踩踏为主,土壤较养殖前紧实。因此,就物理性质变化趋势来看,在 T1、T2 处理中,土壤 0~5 cm 最大持水量变化不明显,但 5~10 cm 主要呈现增加趋势。但在 T3 处理 0~5 cm、5~10 cm 土层最大持水量均显示降低,这说明高密度养殖会降低土壤持水性能。在喀斯特山地林下养鸡,合理养殖密度在 1 200 只 / hm^2 以下较为适宜。

林丽等^[30]研究认为,持久和高强度的放牧干扰将最终改变土壤养分性质。在林下养鸡研究中,草本植被的作用随着养殖密度的增大而减小。养殖密度越大,鸡粪的产量越高,作用更加明显,鸡产生的鸡粪成为土壤养分的主要来源。土壤养分作为直接影响植被生长的元素,关注鸡对土壤养分的影响就更具必要性。喀斯特石漠化山地土层薄、土壤

总量小,长期耕作往往缺乏 SOC。鸡粪作为有机肥的一种,通过自然发酵,长期状态下对 TN 和土壤有机氮组成有显著影响^[31]。大量研究证明,林下养鸡对 TN、SOC 等养分含量具有显著提升作用。张金福^[32]研究表明鸡粪能增加 TN、TP 养分含量,其含量随着土壤剖面加深降低。张显龙^[33]研究认为试验样地 SOC 含量随着养鸡年限的增加而增加。刘志云^[34]研究认为,放牧草地较未放牧对照样地不同土壤深度 SOC、TN 含量显著增加。本研究中,各处理土壤 TN、TP、TK、SOC 相较于养殖前养分含量均有所提高,尤其是 TN、SOC 养分含量的提升是比较高的,在 T2 处理分别最高达到了 69.1% 和 89.5%。这一结果与陈俊华等^[18]认为林下养殖可促进土壤肥力提高的结论总体一致,但并非所有土壤养分都随养殖密度增大而增加,本文研究发现 T3 处理土壤养分 TN、SOC 含量增比低于 T2 处理,这说明在增加 TN、SOC 土壤养分条件下, T2 的投入产出比高于 T3 处理。李双喜^[35]研究发现,在广玉兰林下养鸡一年后土壤中 TN 含量较养殖前有增加的趋势, TP 无一定的变化趋势, TK 含量的变化影响不大,各处理中有增有减。由此可见,各地区林下养鸡后对土壤养分的影响均存在差异性,但可以确定的是林下养鸡对 TN、SOC 含量具有显著促进作用,但对 TP、TK 等养分含量促进效果不明显。

综上所述,单就土壤理化性质而言,喀斯特山地林下养鸡在 1 200 只 / hm^2 养殖密度时效果最佳,对土壤物理性质的影响相对较小,土壤中 TN、SOC 养分含量增加最为明显。

3.2 不同养殖密度林鸡复合系统对林下植被的影响

为了维持生物多样性和生态系统平衡,需要对以人为主导的地区景观环境进行管理^[36]。林禽复合经营的经济效益与生态效益的权衡对于该模式的构建和应用建立具有重要意义^[37]。林下养鸡模式作为强人工干预的林下放牧模式,对林下植被的影响较大,故对林下养鸡草本植被的变化研究不可或缺。结果表明,林下养鸡结束时, T1、T2、T3 处理草本植被生物量均低于 100 kg/hm^2 。经 4 个月恢复期后,各处理草本植被生物量分别为 716.16、70.13、16.4 kg/hm^2 ,较养殖前其恢复速率分别为 41.2%、3.5%、1.5%。这说明林下养鸡对林下植被具有显著影响,且 T2、T3 处理草本植被恢复速度极慢。这与刘志云^[34]研究发现草地放牧后对植物群落的丰富度、多样性指数没有显著影响的观点相左,可能是研究范围与密度关系的不确定导致,本研究的样本面积均为 1 hm^2 的 1/150,研究样本范围的大小、鸡的活

动范围、环境自我修复能力与养鸡密度的关系，会影响到实验结果。另外，喀斯特土层浅薄，土壤总量小，高密度的养殖对应表层土壤的破坏和恢复过程相比非喀斯特区影响更强。据观察，鸡对林下草本植被的破坏主要体现在觅食、刨根与践踏三个方面，对不同的草本植被进行影响的行为也不一致。T3处理中的2种外来植物没有完全消失主要是植被本身的高度及自我保护机制决定的。Faried等^[38]研究发现，草地中养鸡后，草地植物种类组分发生很大变化，即使停止放牧2个月后，也不能恢复到未养鸡之前的草本植物组成，禾本科及阔叶杂草成为草地的主要植物种类，离鸡舍最近的地方草本植物的消耗最为严重。Allison等^[39]研究发现，在草地中养鸡对草地中草本植物的生长和种类具有不同的影响作用。李双喜^[35]通过在广玉兰和柳树下养鸡发现，处理区内草本植物的多样性指数均有所下降，下降幅度与密度成正比。以上观点基本与本研究发现相吻合。

总体来看，鸡对林下草本植被的影响随养殖密度的增大而增大。养殖结束后，T2、T3处理草本植被短时间不易恢复，较养殖结束时其恢复速率均低于5%，对植物物种多样性生态景观具有较强的破坏作用。将养殖密度控制在600只/hm²，有利于保护林下植被的种子不被鸡采食和破坏，每年养殖结束的间歇期，林下植被恢复速度相对较快，较养殖结束时其恢复速率可达41.2%。

3.3 喀斯特山地林鸡复合经营模式构建

在喀斯特山地桃林下进行不同密度的生态养鸡活动后，桃林生态经济价值也发生了相应的变化，结合式(1)与2.3节计算结果，不同养殖密度的林鸡复合模式生态经济价值分别为8.84、16.04、30.44万元/(hm²·a)。相比单一的经济桃林，林禽复合系统从桃子经营转变为桃子与鸡复合经营，且得到的收益随养殖密度增大而增大。但考虑到喀斯特脆弱山地林禽复合经营的可持续性，应将生态指标和经济指标相权衡。

本研究认为，林禽复合经营模式经济价值由养殖密度所决定，但禽类所特有的破坏性对生物多样性的破坏程度会随养殖密度的增加而增加，在T2处理植被生物量就减少了97.8%，说明在生物多样性需要保护的区域，需要进行合理统筹规划才能进行林禽复合经营模式的推广。张海明等^[40]在北京北部山区对不同养殖密度的林下养鸡研究认为，养殖密度超过450只/hm²，林地植被盖度和生物量便会显著降低，养殖密度在150只/hm²就会造成水体

富营养化。理论上讲，养殖密度越大，鸡粪产量越高，土壤养分也会随养殖密度的增加而增加。但本实验结果表明，并非所有土壤养分含量都随养殖密度的增加而增加，土壤中T3处理TN、SOC养分含量均值低于T2处理，说明养分的增加具有上限性，在养殖密度达到一定阶段后，鸡粪对土壤养分的补给作用在变弱。原因可能有三：其一，研究区喀斯特土壤量少，土层浅薄，养分留存能力弱^[12]；其二，方胜等^[14]研究认为，强烈的放牧扰动会使土面和土石面生境土壤稳渗率显著降低。本研究中，增大养殖密度，鸡对林下环境的破坏强度显著增加，主要表现为植被减少，土壤孔隙度减小，饱和导水率降低，可能导致地表径流增强，下渗作用减弱，鸡粪养分流失加快；其三，T3处理中，由于土壤紧实，鸡粪对表层土壤养分的补给作用减弱，土壤内部养分也会逐渐流失，即地下流失，这是由喀斯特地区独特的“筛孔”决定的^[12]，地下孔（裂）隙对养分流失的影响不容忽视^[41]。因此，有理由认为，在养殖密度超过1200只/hm²后，流失的养分便会成为环境超载的部分，成为污染物。这说明在喀斯特山地是不适宜进行高密度林鸡复合经营的。在脆弱的喀斯特山地，合理密度的林下复合经营模式，才是可行的且可持续的发展道路。林下复合经营经济价值虽然随养殖密度的增加而增大，但受水土保持、土壤养分循环、生物多样性、环境承载力等条件约束，若过度追求经济效益，存在环境和景观破坏的风险。

在林禽复合模式应用过程中，应在保证生态系统稳定性的基础上，稳步提升生态经济价值^[42]。在喀斯特山区林鸡复合经营模式的建立，科学性上需要解决的是确定林下生态养鸡最佳养殖密度。李双喜^[35]在上海崇明地区通过研究林下养鸡对土壤物理性质的影响，认为合理饲养密度为450只/hm²。刘婷霞^[17]对浙江临安生态鸡场的山核桃林和早竹林的生物多样性进行了相关分析研究，认为生态鸡场最佳生态承载量为600~750只/hm²。陈俊华等^[18]对川中丘陵区柏树林下养鸡的合理密度进行了探讨，认为柏树林下养鸡在考虑经济效益及水土流失的情况下，合理养殖密度为900只/hm²。舒正悦等^[29]、蔡煜等^[43]在四川盆地低山丘陵区研究认为，柑橘林下养鸡对土壤肥力的影响随着养鸡密度的增加而增强，并且在2400只/hm²处理达到最佳。张显龙^[33]在浑善达克沙地研究认为，养鸡密度为27只/hm²不会对沙草地地上植被产生影响，为最佳放牧密度。

综合土壤理化性质、植被生物量及物种多样

性、生态经济效益等几项指标,本研究认为,在典型喀斯特山地进行林下生态养鸡,选择在对生物多样性保护要求不高且远离水资源保护区的地方,合理划分好禁牧区、轮牧区后,养殖密度控制在 600 只/hm² 较为适宜。这一养殖密度条件下,既可以保证草本植被能够相对较快恢复,还能得到较好的经济收益,有利于可持续发展。在经营模式构建上,本研究以当地贫困户为代表的个体农民为研究单位进行了验证,给予其可以进行养殖的林地,通过企业扶持,科技培训及指导,订单养殖的模式,解决农户市场销售的后顾之忧。在可以进行林鸡模式推广的地区,以每户 1/3 hm² 林地为例,按照 600 只/hm² 的密度进行养殖,农户额外收入达 2.4 万元/a,这一尝试初步获得成功。这表明在喀斯特山地实施科学合理的林下生态养鸡模式能够保障农民的利益,提高单位面积经济林地价值,对稳固脱贫攻坚成果,助力乡村振兴发展具有一定的积极意义。

4 结论

1) 在喀斯特山地进行的 4 个月养殖试验表明,1 200 只/hm² 养殖密度范围内的林下养鸡能够有效改善土壤容重、饱和导水率、孔隙度等物理性质,稳定提高土壤中的 TN、SOC 养分含量。2 400 只/hm² 密度养殖时土壤会出现明显的板结现象,同时还存在养分流失造成面源污染的可能。若仅考虑林下养鸡对土壤理化性质的影响,养殖密度范围应控制在 1 200 只/hm² 以下,养殖密度增大与土壤养分含量增加呈正相关。

2) 林下植被生物量恢复速率随养殖密度增高而降低。在保护植物多样性的前提下,建议在实际生产中科学合理规划布局,划分禁牧区、轮牧区,养殖密度控制在 600 只/hm² 较为适宜,4 个月恢复速率可达 41.2%。

3) 喀斯特山地林鸡复合经营模式最佳养殖密度为 600 只/hm²。按此养殖密度进行“4+4”模式生产,即 4 个月野外养殖,4 个月自然恢复,养殖时促进土壤肥力提高,休牧时能使植被较快恢复,保护林下生态环境。与此同时,桃树和鸡产生的综合生态经济价值可达 8.84 万元/(hm²·a)。

参考文献:

[1] 张槐安. 论把林下经济培育成西部林业新经济增长点——以贵州毕节试验区为例 [C]// 第十五届中国科协年会第 19 分会场: 中国西部生态林业和民生林业与科技创新学术研讨会论文集. 贵阳, 2013: 187-191.
Zhang H A. The Discourse was about Nurturing the under-Forest Economic into a New Economic Growth Point of Western

Forestry: Take the Example of Bijie Test Area of Guizhou[C]// The 19th Session of the 15th China Association for Science and Technology Annual Conference: Proceedings of the Symposium on Ecological Forestry and Livelihood Forestry and Science and Technology Innovation in Western China. Guiyang, 2013: 187-191.

[2] 韩杏容, 黄易, 夏自谦. 林下经济建设项目可持续性评价研究——以贵州省桐梓县为例 [J]. 林业经济, 2011, 33(4): 85-90.
Han X R, Huang Y, Xia Z Q. Study on sustainability evaluation of the under-forestry economy construction project—A case study of Tongzi County, Guizhou Province[J]. Forestry Economics, 2011, 33(4): 85-90.

[3] 张惠敏. 贵州省都匀市林下经济发展模式及相关实例研究 [J]. 林业科技, 2016, 41(2): 54-57.
Zhang H M. The development of forestry economy and study of relevant case in Duyun City, Guizhou Province[J]. Forestry Science & Technology, 2016, 41(2): 54-57.

[4] 龙健, 李娟, 廖洪凯, 等. 中国亚热带喀斯特山区土壤质量演变机理及其调控途径 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Long J, Li J, Liao H K, et al. Mechanism and Regulation of Soil Quality Evolution in the Subtropical Zone of Karst Provinces[M]. Beijing: Science Press, 2015.

[5] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨 [J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
Wang S J. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.

[6] 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 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.
Wang S J. The most serious eco-geologically environmental problem in southwestern China—Karst rocky desertification[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2003, 22(2): 120-126.

[7] 王世杰, 彭韬, 刘再华, 等. 加强喀斯特关键带长期观测研究, 支撑西南石漠化区生态恢复与民生改善 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 925-933.
Wang S J, Peng T, Liu Z H, et al. Strengthen Karst surface systematic processes research, support ecological restoration and social improvement in Karst rocky desertification areas in southwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(7): 925-933.

[8] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性 [J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21-29.
Yang M D. On the fragility of Karst environment[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1990, 2(1): 21-29.

[9] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报 [J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.
Peng T, Wang S J, Zhang X B, et al. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for Karst slopes[J]. Earth and Environment, 2008, 36(2): 125-129.

[10] 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 [J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 185-189.
Zhao Z Q, Hou L S, Cai Y L. The process and mechanism of soil degradation in Karst area in Southwest China[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 185-189.

[11] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤 [J]. 地球科

- 学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- Cao J H, Yuan D X, Pan G X. Some soil features in Karst ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 37-44.
- [12] 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 [J]. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 274-279.
- Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on Karst rocky desertification in Southwest China Karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279.
- [13] 彭韬, 杨涛, 王世杰, 等. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报 [J]. *地球与环境*, 2009, 37(2): 126-130.
- Peng T, Yang T, Wang S J, et al. Monitoring results of soil loss in Karst slopes[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(2): 126-130.
- [14] 方胜, 彭韬, 王世杰, 等. 喀斯特坡地土壤稳渗率空间分布变化特征研究 [J]. *地球与环境*, 2014, 42(1): 1-10.
- Fang S, Peng T, Wang S J, et al. Spatial variation of soil steady-state infiltration rates in Karst hillslopes[J]. *Earth and Environment*, 2014, 42(1): 1-10.
- [15] 邢学刚, 彭韬, 王世杰, 等. 白云岩石漠化坡地土壤改良盆栽试验研究报告——以种植黑麦草为例 [J]. *地球与环境*, 2017, 45(2): 229-235.
- Xing X G, Peng T, Wang S J, et al. Agent and activated carbon as soil amendments on dolomite slopes—A case study of perennial ryegrass[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(2): 229-235.
- [16] 胡振通, 王亚华. 中国生态扶贫的理论创新和实现机制 [J]. *清华大学学报 (哲学社会科学版)*, 2021, 36(1): 168-180, 206.
- Hu Z T, Wang Y H. The theoretical innovation and realization mechanism of the ecological poverty alleviation in China[J]. *Journal of Tsinghua University (Philosophy and Social Sciences)*, 2021, 36(1): 168-180, 206.
- [17] 刘婷霞. 林鸡复合生态系统中生物多样性及土壤肥力的研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
- Liu T X. Biodiversity and soil fertility of the forest-chicken ecosystem[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2013.
- [18] 陈俊华, 龚固堂, 朱志芳, 等. 川中丘陵区柏木林下养鸡的生态经济效益分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(2): 214-219.
- Chen J H, Gong G T, Zhu Z F, et al. Ecological and economic benefits of chicken rearing in cypress forest in hilly areas of central Sichuan[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(2): 214-219.
- [19] 王茹. 复方壮鸡散对汉源县安乐乡林下山地鸡生长、屠宰性能及部分免疫指标的影响研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- Wang R. Effect of "complex strong chicken powder" on growth, slaughter and part of the immune indexes with Hanyuan Anle forests chicken[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [20] Zhang H, He Q F, Pandey S P, et al. Can overgrazing responses be disentangled by above- and below-ground traits?[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 9: 573948.
- [21] Niu L H, Guo Y T, Li Y, et al. Degradation of river ecological quality in Tibet plateau with overgrazing: A quantitative assessment using biotic integrity index improved by random forest[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106948.
- [22] Liu M, Ouyang S N, Tian Y Q, et al. Effects of rotational and continuous overgrazing on newly assimilated C allocation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(2): 193-202.
- [23] 王克林, 苏以荣, 曾馥平, 等. 西南喀斯特典型生态系统土壤特征与植被适应性恢复研究 [J]. *农业现代化研究*, 2008, 29(6): 641-645.
- Wang K L, Su Y R, Zeng F P, et al. Ecological process and vegetation restoration in Karst region of southwest China[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, 29(6): 641-645.
- [24] 黄琳琳, 陈云明, 张升, 等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤特性及细根特征研究 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 37-41.
- Huang L L, Chen Y M, Zhang S, et al. Distribution characteristics of fine root and soil properties in artificial pinus tabulaeformis forest in Loess Hilly Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4): 37-41.
- [25] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 160-170.
- Li D W, Wang Z Q, Tian H X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 160-170.
- [26] 张广帅, 邓浩俊, 杜锬, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例 [J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 675-687.
- Zhang G S, Deng H J, Du K, et al. Soil stoichiometry characteristics at different elevation gradients of a mountain in an area with high frequency debris flow: A case study in Xiaojiang Watershed, Yunnan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 675-687.
- [27] 罗俊, 林兆里, 李诗燕, 等. 不同土壤改良措施对机械压实酸化蔗地土壤理化性质及微生物群落结构的影响 [J]. *作物学报*, 2020, 46(4): 596-613.
- Luo J, Lin Z L, Li S Y, et al. Effects of different soil improvement measures on soil physicochemical properties and microbial community structures in mechanically compacted acidified sugarcane field[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(4): 596-613.
- [28] 曾祥艳, 廖健明, 韦凤英, 等. 林下养鸡对林地土壤特性的影响 [J]. *广西林业科学*, 2014, 43(3): 292-296.
- Zeng X Y, Liao J M, Wei F Y, et al. Effect of feeding chickens under the forest on soil characteristics[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2014, 43(3): 292-296.
- [29] 舒正悦, 王景燕, 龚伟, 等. 复合养殖对柑橘林地土壤微团聚体分形特征及理化性质的影响 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2017, 41(5): 92-98.
- Shu Z Y, Wang J Y, Gong W, et al. Effects of compound management in citrus orchard on soil micro-aggregate fractal features and soil physical and chemical properties[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(5): 92-98.
- [30] 林丽, 张德罡, 曹广民, 等. 放牧强度对高寒嵩草甸土壤养分特性的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4664-4671.
- Lin L, Zhang D G, Cao G M, et al. Responses of soil nutrient traits to grazing intensities in alpine Kobresia meadows[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4664-4671.
- [31] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(1): 87-91.

- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Effects of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(1): 87-91.
- [32] 张金福. 施用鸡粪和化肥对稻麦轮作农田土壤肥力和氮磷迁移的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- Zhang J F. Effects of chicken manure and chemical fertilizer application on soil fertility and transfer of soil N and P in rice-wheat rotation systems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [33] 张显龙. 草原牧鸡生物量置换模式对沙草地生态系统结构与过程影响研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- Zhang X L. Study on effect of biomass substitution pattern of grassland grazing chickens on structure and process of sandy grassland ecosystem[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [34] 刘志云. 牧鸡年限对祁连山高山草地植物群落和种子库分布格局的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- Liu Z Y. Effect of different free-range broiler years on plant community and seed bank in Qilian mountain[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [35] 李双喜. 上海崇明地区“林-草-禽”林牧复合生态系统研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- Li S X. Study on “poultry-woods” silvopastoral system in Chongming Region Shanghai[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [36] Shumi G, Rodrigues P, Hanspach J, et al. Woody plant species diversity as a predictor of ecosystem services in a social-ecological system of southwestern Ethiopia[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36(2): 373-391.
- [37] 刘若琳. 济南市南部山区植物多样性及其服务价值研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- Liu R L. Plant diversity and its ecosystem services in the southern mountainous area of Jinan, China[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [38] Faried M M, Hoult E H, Daniel H. Changes in Botanical Composition under Free-range Chicken Farming[A]. *Agronomy-Growing a greener future, Proceedings of 9th Agronomy Conference 1998*[C]. The regional institute (online publishing), 1998.
- [39] Richard A. Free range chicken grow on trees[J]. *Poultry World*, 2005, 159(1): 26-27.
- [40] 张海明, 乔富强, 张鸿雁, 等. 不同养殖密度的林下养鸡对林地植被及环境质量影响 [J]. *北京农学院学报*, 2016, 31(4): 98-102.
- Zhang H M, Qiao F Q, Zhang H Y, et al. The effects of chicken raising in woods with different breeding density on the vegetation and environmental quality[J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2016, 31(4): 98-102.
- [41] 姚一文, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 雨强和地下孔(裂)隙度对喀斯特坡耕地养分流失的影响 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1): 140-151.
- Yao Y W, Dai Q H, Gan Y X, et al. Effects of rainfall intensity and underground hole (fracture) gap on nutrient loss in Karst sloping farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 140-151.
- [42] 张建, 雷刚, 漆良华, 等. 2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响 [J]. *生态学报*, 2021, 41(4): 1280-1290.
- Zhang J, Lei G, Qi L H, et al. The landscape pattern and ecological service value in Danjiangkou City under land use change from 2003 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(4): 1280-1290.
- [43] 蔡煜, 王景燕, 龚伟, 等. 柑橘林下养鸡对土壤团粒结构分形特征的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2017, 34(2): 225-232.
- Cai Y, Wang J Y, Gong W, et al. Raising chickens in citrus orchards on fractal features of soil aggregates[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2017, 34(2): 225-232.

(责任编辑: 王育花)