



二代野猪放牧对夹金山针阔混交林物种多样性与土壤理化性质的影响

郝建锋^{1,2} 周润惠¹ 姚小兰³ 喻静¹ 陈聪琳¹ 向琳¹ 王姚瑶¹ 苏天成¹
齐锦秋^{1,4*}

¹四川农业大学林学院, 成都 611130; ²四川农业大学水土保持与荒漠化防治实验室, 成都 611130; ³海南大学生态与环境学院, 海口 570228; ⁴四川农业大学木材工业与家具工程实验室, 成都 611130

摘要 为了深入认识二代野猪放牧对夹金山针阔混交林物种多样性特征和土壤理化性质的影响, 以便为该区域针阔混交林的生态稳定性维持以及科学放牧提供参考, 该研究在全面踏查的基础上, 根据牧道数量、面积、野猪行为特征及活动范围划分4种放牧干扰强度(由强到弱依次为I、II、III、IV), 并设置无干扰状态作为对照(CK), 探讨不同放牧干扰强度对物种多样性和土壤理化性质的影响以及二者之间的作用关系。主要结果: (1)共记录到维管植物172种, 隶属于55科117属, 轻度干扰(IV)下乔灌木的科、属、种数目均达到最高。(2)乔灌木3层多样性指数对干扰强度的响应基本一致, IV级干扰下丰富度指数(S)、Shannon多样性指数(H')和Simpson优势度指数(D)达到最大, 高于CK, 随干扰增强多样性水平平均趋下降; 各干扰强度间Pielou均匀度指数(E)差异不显著。(3)相比于CK, 野猪放牧致使土壤含水量、最大含水量、全氮含量下降, 放牧压力越大, 下降比例越大; 土壤孔隙度、全磷、速效磷、有机质含量在IV级干扰时有所增加, I-III级干扰下明显削减; 土壤密度随干扰增强而增大。(4)冗余分析结果表明: 土壤有机质含量、速效磷含量、土壤密度、土壤含水量、土壤孔隙度、全磷含量、全氮含量与多样性指数间均存在极显著相关关系。综上, 轻度干扰有利于群落物种多样性、土壤肥力提高及土壤结构改善, 是夹金山针阔混交林生态稳定性维持的积极因素。为日益扩大的放牧业和渐趋频繁的人为活动干扰背景下, 该区的森林生态环境保护和可持续发展提供了参考。

关键词 二代野猪放牧; 针阔混交林; 物种多样性; 土壤理化性质; 冗余分析

郝建锋, 周润惠, 姚小兰, 喻静, 陈聪琳, 向琳, 王姚瑶, 苏天成, 齐锦秋 (2022). 二代野猪放牧对夹金山针阔混交林物种多样性与土壤理化性质的影响. 植物生态学报, 46, 197-207. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0107

Effects of the second generation wild boar grazing on species diversity and soil physicochemical properties of coniferous-broad-leaved mixed forest in Jiajin Mountain, China

HAO Jian-Feng^{1,2}, ZHOU Run-Hui¹, YAO Xiao-Lan³, YU Jing¹, CHEN Cong-Lin¹, XIANG Lin¹, WANG Yao-Yao¹, SU Tian-Cheng¹, and QI Jin-Qiu^{1,4*}

¹College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; ²Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; ³College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China; and ⁴Laboratory of Wood Industry and Furniture Engineering, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract

Aims The purpose of this study was to understand the effects of the second generation wild boar grazing on species diversity and soil physicochemical properties of coniferous-broad-leaved mixed forest in the Jiajin Mountain, and to provide reference for the maintenance of ecological stability and scientific grazing of the mixed coniferous and broad-leaved forest in this area.

Methods On the basis of comprehensive investigation, according to the number, area, behavior characteristics and activity range of wild boar, four grazing disturbance intensity (from strong to weak was followed by I, II, III, IV) were divided, and no disturbance state was set as control (CK) to explore species diversity and soil physicochemical properties under different grazing disturbance intensity.

Important findings (1) 172 species of vascular plants, belonging to 55 families and 117 genera, were recorded, with the families, genera and species of trees, shrubs and herbs reaching the highest under slight disturbance

收稿日期Received: 2021-03-23 接受日期Accepted: 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(32071591)和国家重点研发计划(2016YFC050330301)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (32071591) and the National Key R&D Program of China (2016YFC050330301).

* 通信作者Corresponding author (704060294@qq.com)

intensity (IV). (2) The responses of tree, shrub and herb diversity index to the disturbance gradient were basically the same, but the richness index (S), Shannon diversity index (H') and Simpson dominance index (D) reached the maximum under the IV level disturbance intensity, which were higher than those in CK. The diversity level tended to decline with the increase of disturbance intensity (IV–I). In addition, for Pielou evenness index (E), there was no significant difference among different disturbance intensity levels. (3) Compared with CK, soil water content, maximum water content and total nitrogen content decreased under wild boar grazing. The greater the grazing pressure, the greater the proportion of decline. The content of soil total porosity, total phosphorus, available phosphorus and organic matter content increased in the IV level of interference, and decreased significantly under the I–III level interference; the soil density increased with the increase of disturbance intensity. (4) Redundancy analysis showed that soil organic matter content, available phosphorus content, soil density, soil water content, soil porosity, total phosphorus content, total nitrogen content and diversity index were significantly correlated. The light disturbance intensity is beneficial to the richness of community species diversity, the improvement of soil fertility and soil structure, which is a positive factor for the maintenance of ecological stability of the mixed coniferous and broad-leaved forest in the Jiajin Mountain. The study provides a reference for the forest ecological environment protection and sustainable development in this area under the background of increasingly expanding grazing and animal husbandry and increasingly frequent disturbance of human activities.

Key words the second generation wild boar grazing; coniferous-broad-leaved mixed forest; species diversity; soil physicochemical property; redundancy analysis (RDA)

Hao JF, Zhou RH, Yao XL, Yu J, Chen CL, Xiang L, Wang YY, Su TC, Qi JQ (2022). Effects of the second generation wild boar grazing on species diversity and soil physicochemical properties of coniferous-broad-leaved mixed forest in Jiajin Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 197-207. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0107

放牧是山地生态系统重要的资源利用方式,特别是在欠发达和贫困山区,放牧仍然是当地居民维持生计的主要途径(阎建忠等, 2005)。放牧会影响土壤生境特征(展鹏飞等, 2018), 改变植被分布状况(张静妮等, 2010; 刘建泉等, 2012), 调整植物功能性状(赵娜等, 2016)。相对于禁牧, 合适的放牧强度能够促进植被的补偿和超补偿生长(闫瑞瑞等, 2010), 但长期过度放牧会导致土壤退化和植被的逆向演替(李西良等, 2015)。Connell于1978年提出了“中度干扰假说”, 认为适度干扰能增加群落和景观的多样性(肖绪培等, 2013)。张静妮等(2010)研究指出轻度放牧有利于草地植物多样性升高和土壤性质改善。但是, 针对具体区域特定放牧状况, 尚无统一的标准和结论。

夹金山位于邛崃山系中心区域-全球生物多样性25个热点地区之一, 夹金山脉大熊猫栖息地国家公园是全球关注的生态系统和价值最突出的自然遗产之一(陈富斌等, 2006), 拥有适宜大熊猫生存与延续的最佳生境以及野生大熊猫总量1/5的优势种群, 该区也是中国西部绿色生态屏障建设的重要环节(陈富斌等, 2002)。近年来, 随着当地“养猪专业合作社”的建立, 大量二代野猪散养于针阔混交林内。夹金山二代野猪是指家养母猪(*Sus scrofa domestica*)与纯种野猪(*Sus scrofa*)相结合的后代, 外形与纯野

猪相似, 且保持了后者凶猛的野性, 抗病力强, 野外适应力强, 肉质好。二代野猪多群居, 喜欢栖身林下与灌丛之地, 与牛羊等喜食植株地上部分的牲畜相比, 二代野猪食性杂且凶猛好斗, 其活动以翻拱扰动为主, 同时大量啃食树叶、草籽、腐殖质及地衣, 致使乔木生长受抑, 灌木折损严重, 多年生草本逐渐被一年生植物所代替, 易造成地表裸露、土壤侵蚀, 引起植被与土壤退化。野猪放牧引发了严重的林牧矛盾, 成为该区森林群落自我恢复的重要障碍(闫瑞瑞等, 2010; 姚茜等, 2015; 陈广磊等, 2016)。

物种多样性是评价植物群落结构和功能的重要指标(杨祥祥等, 2019), 土壤是植物生长发育的基质。土壤供给植物正常生长所需的营养物质、能量和水分; 植被类型、植物生产力水平、枯落物厚度以及放牧干扰强度又影响着土壤特性(肖绪培等, 2013; 梁博等, 2018; 杨祥祥等, 2019)。王兴等(2013)、肖绪培等(2013)均对放牧干扰下物种多样性和土壤理化性质的互作机制展开了探究, 但放牧对象主要为牛、羊、马、鹿、骆驼等, 或者混合放牧(Cierjacks & Hensen, 2004; Rosa García *et al.*, 2013), 较少涉及二代野猪放牧, 且倾向于草原(张静妮等, 2010; 李西良等, 2015; 展鹏飞等, 2018)、高山草甸(林丽等, 2016; 牛钰杰等, 2017, 2018)、灌丛以及人

工林(刘建泉等, 2012; 刘珊珊等, 2014)林下放牧, 对针阔混交林内放牧干扰的探究较少。二代野猪是否会破坏林区物种多样性和土壤状况, 何种放牧强度对于混交林生态系统维持最有利, 这些问题仍有待探究。本研究围绕夹金山针阔混交林这一重要生态系统, 评估其在不同强度二代野猪放牧干扰下的多样性水平和土壤理化性质, 并结合冗余分析探讨二者之间的相关性, 试图寻找植被丰茂生长, 土壤肥力良好, 生态系统稳定性最佳的放牧干扰强度。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

夹金山(102.42°–102.64° E, 30.64°–30.91° N)位于四川省雅安市宝兴县与阿坝州小金县交接处, 地处四川盆地西北部、青藏高原东部边缘, 是国家级森林公园、省级风景名胜区和大熊猫半野生放养保护区。主峰海拔4 930 m, 为青衣江发源地; 居亚热带向暖温带过渡的湿润季风气候带, 属山地气候类

型, 年平均气温8.9 °C, 年降水量776.5 mm, 年日照时间1 400 h; 土壤微酸性, 为山地暗棕壤; 动植物种类丰富, 其中维管植物约3 000种, 主要乔木树种为长尾槭(*Acer caudatum*)、糙皮桦(*Betula utilis*)和冷杉(*Abies fabri*)等。近年来, 二代野猪放牧在夹金山波日沟附近的针阔混交林内大规模展开, 给群落植被生长和稳定性维持造成了干扰。

1.2 样地设置及植被调查方法

在全面踏查的基础上, 根据二代野猪活动情况、牧道数量、面积以及植被破坏程度(刘金鑫, 2012), 以养猪基地为起点, 沿河流逆流而上, 每隔1 000 m左右, 牧道和活动野猪数量显著减少, 在针阔混交林内, 按与河道平行方向划分各级干扰区, 面积约为3 hm², 用“I–IV”表示干扰程度逐级降低。采用典型样地法, 在每个干扰强度内沿河流流向设置4个20 m × 30 m的样地, 同时选取立地条件基本一致, 未受二代野猪干扰的4个样地作为对照(CK), 总计调查20个样地(图1)。

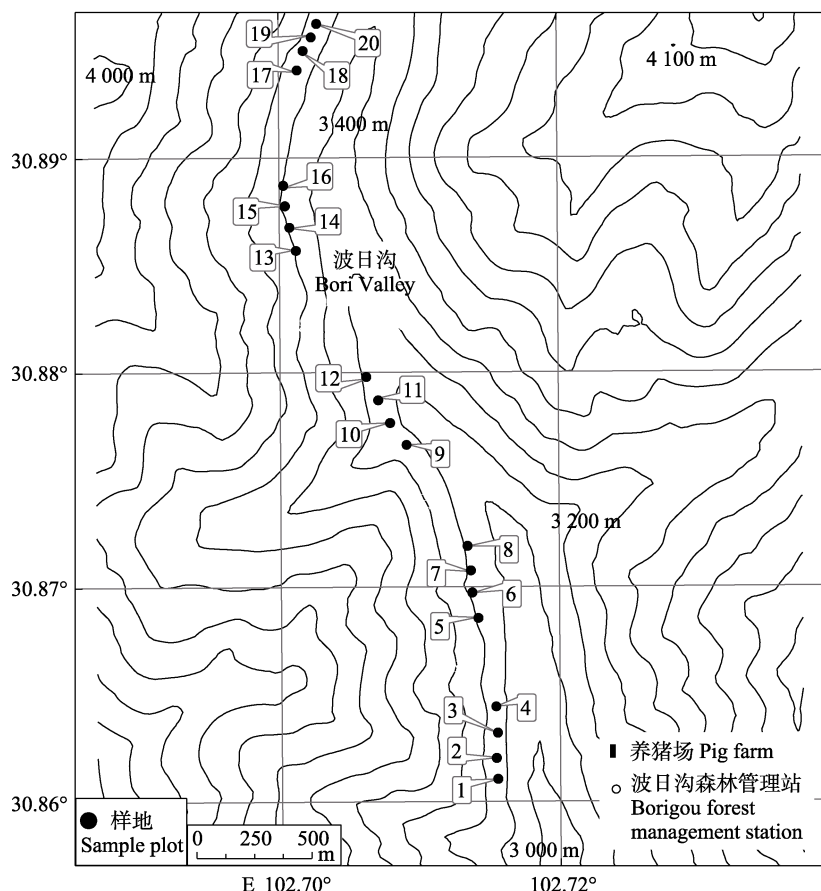


图1 夹金山针阔混交林样地位置图。CK, 对照区(样地17–20); I, 重度干扰(样地1–4); II, 中重度干扰(样地5–8); III, 中度干扰(样地9–12); IV, 轻度干扰(样地13–16)。

Fig. 1 Site location of mixed coniferous and broad-leaved forest in the Jiajin Mountain. CK, control area (plot 17–20); I, heavy disturbance (plot 1–4); II, moderate to heavy disturbance (plot 5–8); III, moderate disturbance (plot 9–12); IV, slight disturbance (plot 13–16).

DOI: 10.17521/cjpe.2021.0107

使用全球定位系统(GPS)对样地定位,记录经度、纬度、海拔,运用DQL-1B型森林罗盘仪测定坡度、坡向。采用相邻格子法在每个样地内设置6个10 m × 10 m的乔木样方,采用对角线法设置6个5 m × 5 m的灌木样方,12个1 m × 1 m的草本样方,调查样方总计480个。对样方内的乔木(胸径(DBH) ≥ 3 cm)进行每木检尺,记录其DBH、树高、冠幅等数据;分别记录灌木(DBH < 3 cm)的种名、高度、冠幅、株数和草本的种名、高度、盖度、株数(丛数)。各样地基本情况见表1。

1.3 物种多样性计算方法

采用α多样性指数综合评估不同放牧干扰强度对夹金山针阔混交林群落物种多样性的影响。公式如下:

$$\text{物种丰富度指数}(S): S = N \quad (1)$$

$$\text{Simpson优势度指数}(D): D = 1 - \sum_{i=1}^N P_i^2 \quad (2)$$

$$\text{Shannon多样性指数}(H'): H' = -\sum_{i=1}^N P_i \log P_i \quad (3)$$

$$\text{Pielou均匀度指数}(E): E = \frac{-\sum P_i \log P_i}{\log N} \quad (4)$$

式中, P_i 为第*i*种的个体数 n_i 占调查物种个体总数 n 的比例,即 $P_i = n_i/n$; $i = 1, 2, 3, \dots, N$, N 为物种数。

1.4 土壤理化性质测定方法

土壤样品的采集与处理:在每个样地中随机选取3个采样点,用环刀取表层(0–20 cm)土壤样品,带回实验室用于土壤水分-物理性质测定;在环刀取样周围重复取0–20 cm土壤3次,共计混合土样1 kg,用于其余土壤指标测定。将取回土样自然风干,剔除植物残体和石碴,过筛研磨,后将样品混匀、装袋密封保存待测。

土壤理化性质测定指标包括:含水量(SWC)、最大含水量、密度(SD)、孔隙度(SP)、pH、全氮(TN)含量、全磷(TP)含量、速效磷(AP)含量、有机质(OM)含量,测定方法参考王媚臻等(2019)。

1.5 数据处理与统计分析

采用Excel 2016进行数据整理,使用Origin 2018软件绘图。运用SPSS 24.0中的单因素方差分析法分别检验不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林各物种多样性指数的差异显著性($\alpha = 0.05$)以及不同干扰强度下土壤理化性质指标的差异显著性($\alpha =$

表1 夹金山针阔混交林不同放牧干扰强度样地概况

Table 1 General characteristics of different grazing disturbance intensity of mixed coniferous and broad-leaved forest plot in the Jiajin Mountain

干扰强度 Disturbance intensity	样地编号 No. of plot	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect (°)	海拔 Altitude (m)	平均胸径 Average diameter at breast height (cm)	平均高度 Average height (m)	密度 Density (Ind. · hm ⁻²)
I	1	25	NE63	2 977	12.39	7.89	883
	2	25	NE45	2 895	12.00	8.23	900
	3	24	NE56	2 896	10.75	7.16	885
	4	24	NE47	2 864	11.90	7.94	946
II	5	25	NE67	2 995	11.29	7.19	1 050
	6	24	NE58	2 990	10.55	7.19	1 066
	7	23	NE56	2 994	14.71	8.40	1 053
	8	25	NE65	2 968	12.74	8.25	1 040
III	9	28	NE81	3 000	12.08	7.72	1 066
	10	25	NE46	3 010	15.04	8.57	1 066
	11	26	NE78	3 002	12.20	8.02	1 079
	12	26	NE80	3 018	15.52	8.58	1 056
IV	13	20	NE76	3 047	11.19	6.77	1 100
	14	23	NE66	2 996	13.10	7.77	1 125
	15	23	NE63	3 025	11.14	7.30	1 143
	16	24	NE53	3 004	11.55	7.62	1 133
CK	17	25	NE64	3 050	10.41	6.92	1 180
	18	25	NE62	3 021	12.29	8.01	1 233
	19	24	NE66	2 998	10.37	6.72	1 156
	20	26	NE59	3 016	12.94	8.89	1 206

CK, 对照区; I, 重度干扰; II, 中重度干扰; III, 中度干扰; IV, 轻度干扰; NE, 东北方向。

CK, control area; I, heavy disturbance; II, moderate to heavy disturbance; III, moderate disturbance; IV, slight disturbance; NE, northeast.

0.05), 进而判断放牧干扰强度对多样性和土壤理化指标影响的显著程度。

采用Canoco 5.0软件中的冗余分析(RDA)研究多样性指数和土壤理化因子间的关系, 并通过蒙特卡洛置换检验确定影响灌草层物种多样性指数的主要因子。

2 结果和分析

2.1 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林群落物种组成

经调查, 共记录到研究区维管植物172种(图2), 隶属于55科117属, 涵盖乔木9科10属13种, 灌木20科27属57种, 草本38科89属128种。对照区和各放牧干扰强度下, 科属种数目均表现为草本层>灌木层>乔木层。各层物种组成动态变化对放牧干扰强度响应一致: 随放牧干扰加重(IV-I), 科属数量整体呈下降趋势, 种的数量逐级递减, 其中, 灌木层由37种降至15种, 减少了59.5%, 草本与乔木层减少幅度次之, 分别为35.1%、27.3%。相比于CK, 重度(I)、中重度(II)、中度(III)干扰下各层物种数削减, 轻度干扰(IV)时却显著攀升, 其中又以灌木增长比率最大, 达32%。可见过度放牧会扰乱植物的正常生长, 使物种数面临威胁, 而适度放牧干扰可以增加混交林物种丰富度, 且灌木层受影响最为明显。

2.2 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林群落物种多样性

群落物种多样性对各级放牧干扰强度的响应情况如图3。从干扰强度的角度分析, 灌草两层丰富度

指数均遵从IV > CK > III > II > I的变化规律, 乔木层表现为IV > CK > III = II > I, IV级干扰或为提高森林植被复杂度的积极因素。乔木与草本层S在II、III、IV、CK之间差异不显著, 仅I级干扰时显著降低; 灌木层S随干扰强度变化呈现出显著差异, 对野猪干扰反应尤为强烈。

与丰富度类似, H' 以草本层最大, 灌木、乔木分居第二、第三。伴随干扰增强, 乔木层、草本层 H' 大致呈先减后增再减的变化趋势, 其增加或减少在相邻干扰等级间不显著, IV级干扰下 H' 达到最高, 略大于CK, I级干扰时降至最低; 灌木层 H' 随干扰增强较大幅度下降, 表现出对高强度野猪干扰的极度不适应。

D 的变化显示: 随干扰强度上升(IV-I), 各层物种的 D 均趋下降, 可能是野猪的翻拱、踩踏等持续扰动在一定程度上破坏了原优势种茂盛生长的“优越条件”, 使其处于与普通物种同样的劣势境况, 优势地位不再凸显。于草本、灌木层而言, D 在II、III、IV级干扰下稍大于CK, 仅I级干扰下降明显; 于乔木层而言, D 在干扰状态下均低于CK, 但差异不显著, 初步判断与乔木树体高大、耐啃啮、稳定性高等特性相关。

E 在各层次、各干扰强度间差异均不显著, 植物总体分布格局受干扰影响微弱。草本植物在II级干扰下分布相对均匀, 灌木、乔木层物种在IV级干扰时达最离散状态。

2.3 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林土壤理化性质特征

土壤各物理指标(图4)变化趋势不尽相同, 随干

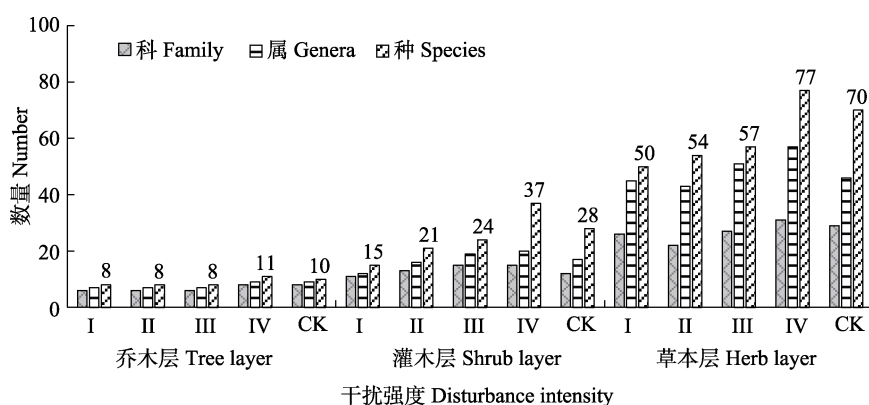


图2 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林群落物种组成。CK, 对照区; I, 重度干扰; II, 中重度干扰; III, 中度干扰; IV, 轻度干扰。

Fig. 2 Species composition of coniferous-broad-leaved mixed forest in the Jiajin Mountain under different grazing disturbance intensities. CK, control area; I, heavy disturbance; II, moderate to heavy disturbance; III, moderate disturbance; IV, slight disturbance.

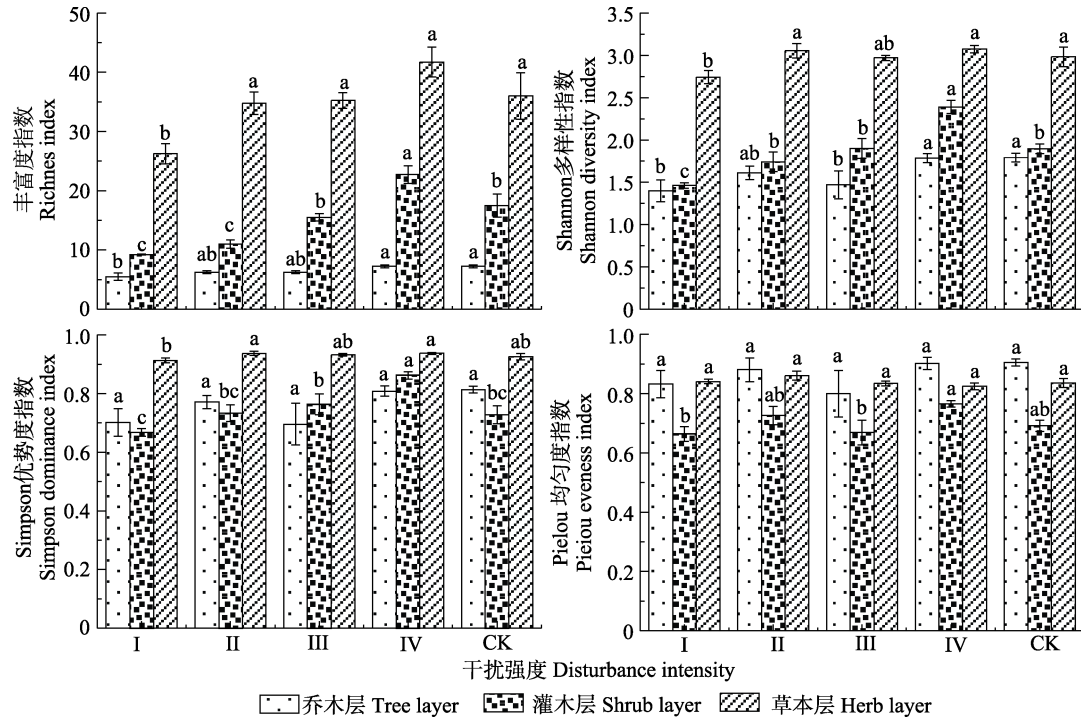


图3 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林群落的物种多样性指数(平均值 \pm 标准误)。CK, 对照区; I, 重度干扰; II, 中重度干扰; III, 中度干扰; IV, 轻度干扰。不同小写字母代表在不同干扰强度下存在显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 3 Species diversity index of coniferous-broad-leaved mixed forest communities in the Jiajin Mountain under different grazing disturbance intensities (mean \pm SE). CK, control area; I, heavy disturbance; II, moderate to heavy disturbance; III, moderate disturbance; IV, slight disturbance. Different lowercase letters represent significant differences among different grazing disturbance intensities ($p < 0.05$).

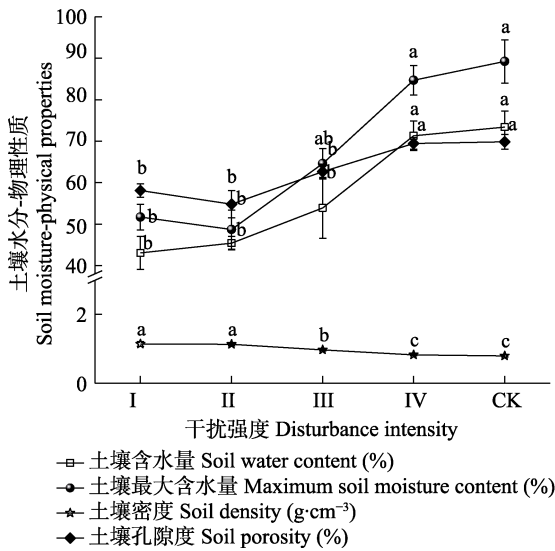


图4 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林土壤水分-物理性质(平均值 \pm 标准误)。CK, 对照区; I, 重度干扰; II, 中重度干扰; III, 中度干扰; IV, 轻度干扰。不同小写字母代表存在显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 4 Soil moisture-physical properties of coniferous-broad-leaved mixed forest in the Jiajin Mountain under different grazing disturbance intensities (mean \pm SE). CK, control area; I, heavy disturbance; II, moderate to heavy disturbance; III, moderate disturbance; IV, slight disturbance. Different lowercase letters represent significant differences ($p < 0.05$).

扰加强, SWC不断减少; 土壤最大含水量和SP变化一致, 从IV到II级逐级减少, I级略有上升; SD呈相反的变动规律, 干扰越强, SD越大。与CK相比, 放牧使得SWC、最大含水量和SP下降, 但SD有所增加。I-III级放牧干扰下各指标削减或增加明显, 土壤水分供应、透气透水性变差; IV级干扰下各指标与CK差距极其微小, 未达到显著水平, 基本维持了土壤原本的质地结构和通气状况。

研究区土壤呈弱酸性(表2), pH在4.5–6.5间浮动, I级干扰下土壤酸化明显。土壤各化学指标具有相似的变化趋势, 与CK相比, IV级干扰时各养分(TP、AP、OM)含量升高或得到基本维持(TN含量), 但继续加重干扰(III、II、I), 会造成各元素含量的降低, 其中又以AP的流失最为快速显著, TN、TP、OM含量在I级干扰时大幅减少, 其他干扰强度间变化相对微弱。

2.4 物种多样性与土壤理化性质的冗余分析

将D、S、H和E共4个多样性指标, 分乔木、灌木、草本3个层次, 共12个种类作为响应变量, 与作为解释变量的8个土壤理化因子(SWC、SD、SP、

表2 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林土壤化学性质(平均值±标准误)
Table 2 Soil chemical properties of coniferous-broad-leaved mixed forest in the Jiajin Mountain under different grazing disturbance intensities (mean ± SE)

土壤化学性质 Soil chemical property	干扰强度 Disturbance intensity				
	I	II	III	IV	CK
pH	4.74 ± 0.24 ^b	5.58 ± 0.42 ^{ab}	5.30 ± 0.27 ^{ab}	5.60 ± 0.43 ^{ab}	6.46 ± 0.09 ^a
全氮含量 Total nitrogen content (mg·g ⁻¹)	3.29 ± 0.09 ^b	3.48 ± 0.33 ^b	4.30 ± 0.04 ^a	4.42 ± 0.08 ^a	4.78 ± 0.35 ^a
全磷含量 Total phosphorus content (mg·g ⁻¹)	3.19 ± 0.44 ^b	4.84 ± 0.19 ^a	4.64 ± 0.34 ^a	5.49 ± 0.24 ^a	4.87 ± 0.12 ^a
速效磷含量 Available phosphorus content (mg·kg ⁻¹)	66.97 ± 4.91 ^d	83.72 ± 6.58 ^{cd}	120.01 ± 3.18 ^c	377.60 ± 18.77 ^b	220.78 ± 17.96 ^a
有机质含量 Organic matter content (mg·g ⁻¹)	33.31 ± 3.61 ^b	60.46 ± 1.00 ^a	62.71 ± 3.90 ^a	74.44 ± 3.64 ^a	68.35 ± 4.21 ^a

I, 重度干扰; II, 中重度干扰; III, 中度干扰; IV, 轻度干扰。同一行不同小写字母代表存在显著差异($p < 0.05$)。
I, heavy disturbance; II, moderate to heavy disturbance; III, moderate disturbance; IV, slight disturbance. Different lowercase letters in the same row represent significant difference ($p < 0.05$).

表3 夹金山针阔混交林物种多样性与土壤理化因子的冗余分析(RDA)排序及蒙特卡洛置换检验结果
Table 3 Results of redundancy analysis sequencing and Monte-Carlo permutation test on species diversity and soil physicochemical properties of coniferous-broad-leaved mixed forest in the Jiajin Mountain

土壤理化因子 Soil physicochemical factor	RDA 1	RDA 2	<i>F</i>	解释变异量 Explains variation (%)	<i>p</i>
有机质含量 Organic matter content	-0.862 3	0.103 3	25.1	58.2	0.002**
有效磷含量 Available phosphorus content	-0.840 8	-0.083 9	22.3	55.4	0.002**
土壤密度 Soil density	0.812 6	0.132 1	19.4	51.9	0.002**
土壤含水量 Soil water content	-0.698 0	-0.138 2	11.4	38.9	0.002**
土壤孔隙度 Soil porosity	-0.640 2	-0.266 3	8.7	32.6	0.004**
全磷含量 Total phosphorus content	-0.634 7	0.209 7	8.5	32.0	0.004**
全氮含量 Total nitrogen content	-0.578 9	-0.304 3	6.8	27.3	0.006**
pH	-0.426 3	0.400 1	3.4	15.8	0.062
特征参数 Characteristic parameter					
特征值 Eigenvalues	0.708 2	0.047 0			
累积解释变异 Explained variation (%)	70.82	75.51			
多样性-土壤因子关系的累积解释量 Cumulative explanatory quantity of relationship between diversity and soil factors (%)	88.56	94.43			

**, $p < 0.01$.

TN含量、TP含量、AP含量、OM含量、pH)进行RDA排序。结果(表3)显示, RDA在前两轴保留了物种多样性特征数据总方差的75.51%, 对多样性与土壤理化因子关系的累积解释量高达94.43%。

RDA结果彰显了乔灌木各层物种多样性与土壤理化因子之间的相关性(表3; 图5)。RDA 1轴主要反映了SD、SWC、SP、OM、AP、TP、TN含量的梯度变化, RDA 2轴中, pH、TN含量的梯度变化得到主要反映, 但实际解释率仍低于RDA 1轴, 可见RDA 1轴已充分反映了各指标的梯度水平。乔木层中, E 、 S 、 H' 、 D 与SD呈负相关关系, 与pH、SWC、SP、TP、OM、AP、TN含量呈正相关关系, 且其正/负相关程度均表现为 $S > H' > D > E$ 。灌木层4个多样性指数与SD呈负相关关系, 与其余7个理化因子呈正相关关系, 相关性排序与乔木层一致。于草

本层而言, E 与SD呈正相关关系, 与其余7个土壤理化因子呈负相关关系; S 、 H' 、 D 与SD负相关, 与其余7个理化因子呈正相关关系, 关联大小依次为 $H' > D > E$ 。蒙特卡洛置换检验结果显示, OM含量、AP含量、SD、SWC、SP、TP含量、TN含量对多样性指数变化的解释率分别为58.2%、55.4%、51.9%、38.9%、32.6%、32%、27.3%, 均达到了极显著水平($p < 0.01$), 是影响物种多样性的主要土壤因素。

3 讨论

3.1 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林群落物种多样性特征

植物资源是人类重要的可再生自然资源, 放牧牲畜主要通过采食、践踏和排便等行为对植被物种

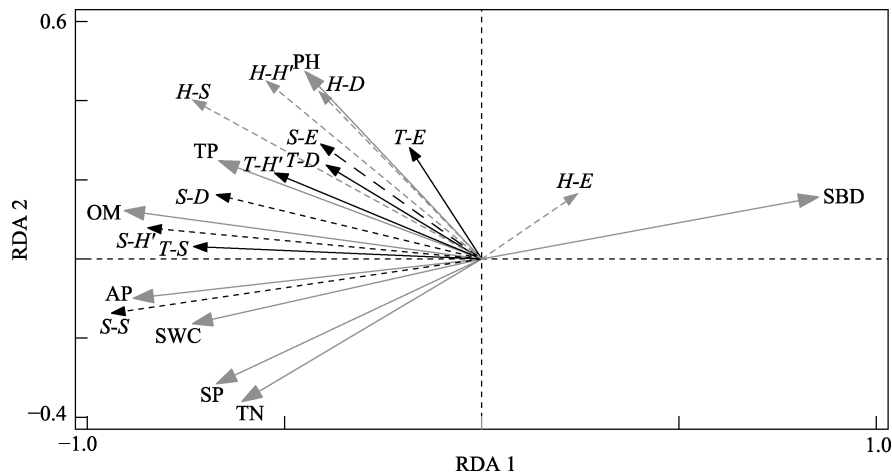


图5 物种多样性与土壤理化因子的冗余分析(RDA)排序图。灰色虚线箭头表示草本层物种多样性指数, 黑色虚线箭头表示乔木层物种多样性指数, 黑色实线箭头表示灌木层物种多样性指数, 灰色实线箭头表示土壤理化因子。H-S, 草本层丰富度指数; H-H', 草本层多样性指数; H-D, 草本层优势度指数; H-E, 草本层均匀度指数; S-S, 灌木层丰富度指数; S-H', 灌木层多样性指数; S-D, 灌木层优势度指数; S-E, 灌木层均匀度指数; T-S, 乔木层丰富度指数; T-H', 乔木层多样性指数; T-D, 乔木层优势度指数; T-E, 乔木层均匀度指数。AP, 有效磷含量; OM, 有机质含量; SD, 土壤密度; SP, 土壤孔隙度; SWC, 土壤含水量; TN, 全氮含量; TP, 全磷含量。

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) ordination map of species diversity and soil physicochemical factors. The gray dotted line arrow represents the species diversity index of the herb layer, the black dotted line arrow represents the species diversity index of the tree layer, the black solid line arrow represents the species diversity index of the shrub layer, and the gray solid line arrow represents the soil physical and chemical factors. H-S, species richness index of herb layer; H-H', Shannon-Wiener diversity index of herb layer; H-D, Simpson dominance index of herb layer; H-E, Pielou evenness index of herb layer; S-S, species richness index of shrub layer; S-H', Shannon-Wiener diversity index of shrub layer; S-D, Simpson dominance index of shrub layer; S-E, Pielou evenness index of shrub layer; T-S, species richness index of tree layer; T-H', Shannon-Wiener diversity index of tree layer; T-D, Simpson dominance index of tree layer; T-E, Pielou evenness index of tree layer. AP, available phosphorus content; OM, organic matter content; SD, soil density; SP, soil porosity; SWC, soil water content content; TN, total nitrogen content; TP, total phosphorus content.

多样性、群落生产力以及生态系统产生影响(殷国梅等, 2013)。本研究中, 相对于CK, 仅IV级干扰下各层物种丰富度和均匀度有所增加, III-I级干扰下物种多样性均降低, 这与张静妮等(2010)的结论相近, 轻度干扰对针阔混交林内物种多样性增加有明显的促进作用, 可能与二代野猪极为强烈的破坏力有关, 夹金山针阔混交林内的二代野猪为纯种野猪与家猪的结合, 性情凶猛, 活动范围更广, 对植被的破坏性更强, 轻微扰动即削弱群落中原优势种的数量与竞争力, 为植物新成员提供了小生境, 耐啃噬、生命力强的新物种逐渐迁入, 群落物种丰富度增加, 与王兴等(2013)“适度干扰导致群落中主要植物优势地位被明显替代, 物种多样性得到维持甚至提高”的结论一致。中、重度放牧干扰(III-I)给植被造成了高强度机械和生理危害, 植株数量和质量大幅度损失, 短时间内难以恢复, 加之重度干扰实则强化了对极少数抗性突出、侵占能力强的物种的选择, 绝大多数物种受害严重并退出群落, 不利于群落相对稳定生境的维持, 多样性水平整体下降。综合来看,

本研究结果仍然支持“中度干扰假说”, 即适度的、中等的干扰强度和频率仍是植被良好生长和森林生态维持长期活力的重要因素, 不可简单地排除干扰。但鉴于研究对象二代野猪破坏力度极大, 导致干扰程度整体偏高, 研究所设置的“轻度干扰”成为有利于夹金山植被物种多样性提升的干扰强度。

灌木层植物种类和分布对野猪干扰的响应最为强烈, 或与二代野猪食性、取食便宜度及活动方式相关。二代野猪对乔木的破坏多局限在树皮、根茎处, 且乔木耐冲击和啃食能力强, 受破坏程度有限; 灌木因受枝叶啃食、土壤翻拱等多重集中破坏而折损严重, 物种多样性下降明显且恢复缓慢, 间接为草丛腾出生长空间; 草本受危害主要源于野猪践踏, 但草本群落重建迅速, 许多抗性强、具微毒或野猪不喜食的一年生草本入侵定居, 成为放牧干扰胁迫下新的优势种。

3.2 不同放牧干扰强度下夹金山针阔混交林土壤理化性质特征

放牧对土壤生态系统的干扰主要表现为牲畜

(猪、羊、牛等)的践踏活动对土壤紧实度、SP、渗透性等的影响(高英志等, 2004)。其中, 二代野猪长期的践踏和拱土行为会减少地表枯落物含量(展鹏飞等, 2018), 间接影响土壤性状。SD是评价土壤紧实度和土壤结构状况的指标, 它与SP和渗透程度密切相关, 本研究中野猪干扰越强, SD越大, SP整体下降, 这是因为土壤经反复踩踏后变得平整紧实, 大($>50\ \mu\text{m}$)、中等($9\text{--}50\ \mu\text{m}$)孔隙丧失(Villamil *et al.*, 2001), 且土壤表层植物根系受破坏数量减少, 透气透水性能低下。SWC受大气降水蒸发、植物吸收蒸腾和土壤特性等影响, 是决定植物生长及系统构成的重要指标(张静妮等, 2010)。随放牧干扰增强, 混交林内SWC降低, 这在于紧实的土壤结构阻止了大气降水的下渗和蓄积, 被啃食严重的植物及受损根系对水分的吸持减少, 同时裸露的地表又加剧了水分的蒸散, 因此土壤保水持水能力下降(孙海燕等, 2015)。I级放牧干扰下SP、最大含水量有所回升, 与陈广磊等(2016)的结论相似, 即重度放牧干扰下, 大量植物残体的归还会增加SP, 使土壤最大持水量增加, 水源涵养功能得到恢复和改善。总的来看, 过度放牧使土壤物理性质恶化, 与许多学者(刘珊珊等, 2014; 马静利等, 2018)结果一致, 轻度干扰下土壤结构受影响不显著, 处于保证土壤稳定性维持的可控范围之内。

放牧通过影响土壤中养分的固持、转移和再分配过程进而改变土壤肥力(马静利等, 2018)。轻度放牧干扰时磷、有机质含量显著提高, 氮含量基本维持不变, 中、重度干扰时各养分含量均趋减少, 这是因为轻度干扰下植被受破坏轻微, 且野猪排泄物可补给土壤损失养分; 中、重度干扰下野猪的大量采食造成植株地上部分输出增加, 土壤中枯落物归还量减少, 有机质和养分含量随之降低。氮主要供植物消耗, 与此同时, 野猪粪便可作部分补充, 故土壤氮变化具有复杂性(肖绪培等, 2013), 本研究结果显示TN含量随放牧干扰加重而减少, 与王长庭等(2008)的结论趋同, 与安慧和徐坤(2013)的结果相悖; 土壤TP含量受干扰影响较弱, AP含量却大幅减少, 这是由于磷主要受土壤类型、气候条件等影响, 短期低强度放牧对磷作用微弱(孙世贤等, 2013), 而植物对AP的吸收转移量更大, 其含量变化更为显著。野猪通过抑制植物生长, 间接改变土壤OM含量, 故OM含量随放牧干扰强度的增加而下降比较缓慢。

3.3 夹金山针阔混交林内物种多样性与土壤理化性质的相关性

家畜践踏、排泄等活动通过影响土壤异质性间接影响植被空间分布(殷国梅等, 2013), 并最终改变植物赖以生存的土壤环境(Rosa García *et al.*, 2013)。RDA显示土壤多个理化因子(SD、SWC、SP、OM、AP、TP、TN含量)与多样性指数间均存在极显著相关关系, 这是因为野猪干扰胁迫下, 物种多样性的减少将直接导致凋落物等养分归还量下降、地表裸露增加, 并间接影响土壤通气性能和保水能力; 而土壤物理结构恶化和肥力削弱又会加重植株的生长压力, 二者互为制约。OM、AP含量、SD对多样性指数变化的解释率均大于50%, 其中, 土壤OM是植物养分元素循环的中心(高英志等, 2004), AP在植物体内的吸收和转化率更高, 而SD与地上植被覆盖度息息相关。同时发现, SD与除草本层E以外的11个指数均呈负相关关系, 这可能是因为野猪干扰增强在抑制草本层原优势种生长的同时, 使适应性更强的草本植物较乔、灌层更迅速入侵定居, 草丛均匀度与SD同步上升。

4 结论

二代野猪放牧对夹金山针阔混交林影响明显不可忽略。轻度放牧干扰(IV)下群落物种多样性水平整体提升, 土壤理化性质得到基本维持或改善, 较之对照处理具有一定的生态效益; 相比之下, 中度及以上强度野猪放牧(III-I)破坏性过大, 不利于植被生长和土壤改良, 长期高强度放牧或将引起该区生态系统衰退。鉴于此, 合理放牧, 将野猪放牧控制在轻度等级(即养猪场距针阔混交林约5 km), 可兼顾地上植被多样性维持和土壤肥力、土壤结构状况的改善, 进而建立起地上与地下协同互作的关系, 为夹金山针阔混交林群落稳定性维持、野生大熊猫栖息地保护及该区科学放牧和管理经营提供重要支撑。

参考文献

- An H, Xu K (2013). The effect of grazing disturbance on soil properties in desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 22, 35-42. [安慧, 徐坤 (2013). 放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响. 草业学报, 22, 35-42.]
- Chen FB, Zhao YT, Lan LB (2002). Discussion on the value of world heritage for Jiajin Mountains giant Panda habitat of

- Sichuan. *Journal of Mountain Science*, 20, 687-694. [陈富斌, 赵永涛, 兰立波 (2002). 论夹金山脉大熊猫栖息地的世界自然遗产价值. 山地学报, 20, 687-694.]
- Chen FB, Zhao YT, Lan LB, Chen FH (2006). Model of national park for management natural heritage of giant Panda habitat in Jiashan Mountains. *Journal of Mountain Science*, 24, 734-738. [陈富斌, 赵永涛, 兰立波, 陈飞虎 (2006). 夹金山脉大熊猫栖息地自然遗产的国家公园管理模式. 山地学报, 24, 734-738.]
- Chen GL, Tian K, Wang H, Zhang Y, Sun M, Liu ZY, Zhang XN, Xiao DR (2016). The response of soil water-holding capacity to different livestock patterns in plateau Napahai wetland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 30, 123-129. [陈广磊, 田昆, 王行, 张贇, 孙梅, 刘振亚, 张晓宁, 肖德荣 (2016). 高原湿地纳帕海土壤持水力对不同放牧的响应. 水土保持学报, 30, 123-129.]
- Cierjacks A, Hensen I (2004). Variation of stand structure and regeneration of Mediterranean holm oak along a grazing intensity gradient. *Plant Ecology*, 173, 215-223.
- Gao YZ, Han XG, Wang SP (2004). The effect of grazing on grassland soils. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 790-797. [高英志, 韩兴国, 汪诗平 (2004). 放牧对草原土壤的影响. 生态学报, 24, 790-797.]
- Li XL, Liu ZY, Hou XY, Wu XH, Wang Z, Hu J, Wu ZN (2015). Plant functional traits and their trade-offs in response to grazing: a review. *Chinese Bulletin of Botany*, 50, 159-170. [李西良, 刘志英, 侯向阳, 吴新宏, 王珍, 胡静, 武自念 (2015). 放牧对草原植物功能性状及其权衡关系的调控. 植物学报, 50, 159-170.]
- Liang B, Nie XG, Wan D, Yu W, Sun QW, Zhao W (2018). Impacts of forest typical of the southern piedmont of the Himalaya Mountains on soil physicochemical properties and erodibility K. *Acta Pedologica Sinica*, 55, 1377-1388. [梁博, 聂晓刚, 万丹, 喻武, 孙启武, 赵薇 (2018). 喜马拉雅山脉南麓典型林地对土壤理化性质及可蚀性K值影响. 土壤学报, 55, 1377-1388.]
- Lin L, Zhang DG, Cao GM, Ouyang JZ, Liu SL, Zhang FW, Li YK, Guo XW (2016). Plant functional groups numerical characteristics responses to different grazing intensities under different community succession stages of Alpine Kobresia meadow in spring. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 8034-8043. [林丽, 张德罡, 曹广民, 欧阳经政, 刘淑丽, 张法伟, 李以康, 郭小伟 (2016). 高寒嵩草草甸植物群落数量特征对不同利用强度的短期响应. 生态学报, 36, 8034-8043.]
- Liu JQ, Luo YS, Lv HY (2012). Structure and dynamics of *Picea crassifolia* populations with graze disturbance in different seasons of enclosed forest. *Pratacultural Science*, 29, 983-988. [刘建泉, 罗永寿, 吕海元 (2012). 不同封育季节放牧干扰对青海云杉种群结构和动态的影响. 草业科学, 29, 983-988.]
- Liu JX (2012). *Effects of Grazing on Community Characteristics in Mountain Forest-Arid Valley Ecotone in the Upper Reach of Minjiang River*. Master degree dissertation, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan. [刘金鑫 (2012). 放牧干扰对山地森林/干旱河谷交错带植物群落特征的影响. 硕士学位论文, 四川农业大学, 四川雅安.]
- Liu SS, Zhang XH, Gong YB, Wang F, Wang Y, Yin YJ, Li Y, Ma JS, Guo T (2014). Effect of grazing disturbance on soil carbon and carbon management index in mountain forest-the arid valley ecotone in upper reaches of Minjiang River. *Soils*, 46, 799-805. [刘珊珊, 张兴华, 宫渊波, 王芬, 王燕, 尹艳杰, 李渊, 马金松, 郭挺 (2014). 放牧干扰对岷江上游山地森林/干旱河谷交错带土壤有机碳及其碳库管理指数的影响. 土壤, 46, 799-805.]
- Ma JL, Ma HB, Shen Y, Xu DM, Wang L, Xie YZ, Li XW (2018). Effects of different rotational grazing methods on soil physical and chemical properties and steppe health in desert steppe. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32, 151-156. [马静利, 马红彬, 沈艳, 许冬梅, 王丽, 谢应忠, 李小伟 (2018). 不同轮牧方式对荒漠草原土壤理化性质及草地健康的影响. 水土保持学报, 32, 151-156.]
- Niu YJ, Yang SW, Wang GZ, Liu L, Du GZ, Hua LM (2018). Relationship between plant species, life form, and functional group diversity, and biomass under grazing disturbance for four years on an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 4733-4743. [牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 刘丽, 杜国祯, 花立民 (2018). 放牧干扰下高寒草甸物种、生活型和功能群多样性与生物量的关系. 生态学报, 38, 4733-4743.]
- Niu YJ, Yang SW, Wang GZ, Liu L, Hua LM (2017). Evaluation and selection of species diversity index under grazing disturbance in alpine meadow. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 1824-1832. [牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 刘丽, 花立民 (2017). 放牧干扰下高寒草甸物种多样性指数评价与选择. 应用生态学报, 28, 1824-1832.]
- Rosa García R, Fraser MD, Celaya R, Ferreira LMM, García U, Osoro K (2013). Grazing land management and biodiversity in the Atlantic European heathlands: a review. *Agroforestry Systems*, 87, 19-43.
- Sun HY, Wan SB, Li L, Liu DW (2015). Effects of grazing on soil nutrients and microbial biomass in desert steppe. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 35, 82-88. [孙海燕, 万书波, 李林, 刘登望 (2015). 放牧对荒漠草原土壤养分及微生物量的影响. 水土保持通报, 35, 82-88.]
- Sun SX, Wei ZJ, Chen LB, Lü SJ, Chen Y, Wang M (2013). Effects of seasonal regulation of grazing intensity on soil nutrients in *Stipa breviflora* desert grassland. *Ecology and Environmental Sciences*, 22, 748-754. [孙世贤, 卫智军, 陈立波, 吕世杰, 陈越, 王敏 (2013). 放牧强度季节调控对短花针茅荒漠草原土壤养分的影响. 生态环境学报, 22, 748-754.]
- Villamil MB, Amioti NM, Peinemann N (2001). Soil degradation related to overgrazing in the semi-arid southern

- caldenal area of Argentina. *Soil Science*, 166, 441-452.
- Wang CT, Long RJ, Wang QL, Cao GM, Shi JJ, Du YG (2008). Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 4144-4152. [王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 曹广民, 施建军, 杜岩功 (2008). 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应. *生态学报*, 28, 4144-4152.]
- Wang MZ, Bi HJ, Jin S, Liu J, Liu YH, Wang Y, Qi JQ, Hao JF (2019). Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 981-988. [王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 刘佳, 刘宇航, 王宇, 齐锦秋, 郝建锋 (2019). 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. *生态学报*, 39, 981-988.]
- Wang X, Song NP, Yang XG, Yang MX, Xiao XP (2013). The response of grassland plant diversity to soil factors under grazing disturbance. *Acta Prataculturae Sinica*, 22, 27-36. [王兴, 宋乃平, 杨新国, 杨明秀, 肖绪培 (2013). 放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应. *草业学报*, 22, 27-36.]
- Xiao XP, Song NP, Wang X, Yang MX, Xie TT (2013). Effects of grazing disturbance to the soil and vegetation of desert grassland. *Soil and Water Conservation in China*, (12), 19-23. [肖绪培, 宋乃平, 王兴, 杨明秀, 谢腾腾 (2013). 放牧干扰对荒漠草原土壤和植被的影响. *中国水土保持*, (12), 19-23.]
- Yan JZ, Zhang YL, Bai WQ, Zhu HY, Bao WK, Liu YH (2005). Livelihood succession and land use/cover change in the Upper Reaches of Dadu River watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 21, 83-89. [阎建忠, 张镡锂, 摆万奇, 朱会义, 包维楷, 刘燕华 (2005). 大渡河上游生计方式的时空格局与土地利用/覆被变化. *农业工程学报*, 21, 83-89.]
- Yan RR, Xin XP, Zhang BH, Yan YC, Yang GX (2010). Influence of cattle grazing gradient on plant community characteristics in Hulunber meadow steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 32, 62-67. [闫瑞瑞, 辛晓平, 张宝辉, 闫玉春, 杨桂霞 (2010). 肉牛放牧梯度对呼伦贝尔草甸草原植物群落特征的影响. *中国草地学报*, 32, 62-67.]
- Yang XX, Li MQ, He XD, You WX, Yu D, Zhang CH, Chen N (2019). Effects of C:N:P ratio on species diversity of preliminary plant communities on sandy land. *Acta Pedologica Sinica*, 56, 242-249. [杨祥祥, 李梦琦, 何兴东, 尤万学, 余殿, 张彩华, 陈娜 (2019). 沙地土壤C:N:P比对早期植物群落物种多样性的影响. *土壤学报*, 56, 242-249.]
- Yao X, Tian K, Xiao DR, Yang HS, Cao PL (2015). Response of plant diversity and soil organic matter to pig forage disturbance in Napahai wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 1218-1222. [姚茜, 田昆, 肖德荣, 杨洪昇, 曹萍麟 (2015). 纳帕海湿地植物多样性及土壤有机质对猪拱干扰的响应. *生态学杂志*, 34, 1218-1222.]
- Yin GM, Wang MY, Xue YL, Zhao HP (2013). Effect of different grazing patterns on vegetation characteristics of meadow steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 35, 89-93. [殷国梅, 王明盈, 薛艳林, 赵和平 (2013). 草甸草原区不同放牧方式对植被群落特征的影响. *中国草地学报*, 35, 89-93.]
- Zhan PF, Xiao DR, Yan PF, Liu ZY, Ma JC, Chen ZM, Ge R, Tian W, Wang H (2018). Soil degradation-associated microbial community structure changes in an alpine meadow under Tibetan pig herding. *Environmental Science*, 39, 1840-1850. [展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (2018). 藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化. *环境科学*, 39, 1840-1850.]
- Zhang JN, Lai X, Li G, Zhao JN, Zhang YS, Yang DL (2010). Response of plant diversity and soil nutrient condition to grazing disturbance in *Stipa baicalensis* Roshev. grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 18, 177-182. [张静妮, 赖欣, 李刚, 赵建宁, 张永生, 杨殿林 (2010). 贝加尔针茅草原植物多样性及土壤养分对放牧干扰的响应. *草地学报*, 18, 177-182.]
- Zhao N, Zhao XQ, Zhao L, Xu SX, Zou XY (2016). Progress in researches of the response of plant functional traits to grazing disturbance. *Chinese Journal of Ecology*, 35, 1916-1926. [赵娜, 赵新全, 赵亮, 徐世晓, 邹小艳 (2016). 植物功能性状对放牧干扰的响应. *生态学杂志*, 35, 1916-1926.]

责任编辑: 李镇清 编辑: 赵航