

人为干扰对桂西北喀斯特山地植被多样性及土壤养分分布的影响

李胜平^{1,2,3}, 王克林^{1,2}

(1. 中国科学院 亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2. 中国科学院 环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为促进桂西北喀斯特山地草地生态系统的恢复与重建,在连续 3 年全面调查的基础上,采用 Pearson 相关系数法和主成分法研究了人为干扰对喀斯特山地草地植被多样性和土壤养分的影响。结果表明:人为干扰对喀斯特山地草地植被多样性具有明显的影响,其中人为干扰显著降低了植被盖度、地上生物量、丰富度指数和多样性指数($p < 0.05$),对喀斯特山地草地植被均匀度指数和优势度指数没有显著影响($p > 0.05$),说明人为干扰并没有改变物种在生境中的均匀分布和物种发生根本性变化。人为干扰显著增加了土壤容重和 pH 值($p < 0.05$),降低了土壤含水量和土壤电导率,但 4 种营养元素(碳、氮、磷、钾)的变化幅度不尽一致,具体表现为人为干扰降低了土壤碳、氮和钾含量,但对土壤磷素并没有显著的影响($p > 0.05$),从降低幅度来看,土壤有效养分降低幅度高于土壤全量养分,由此表明土壤有效养分较土壤全量养分更为敏感。Pearson 相关性分析表明,对于人为干扰区 and 对照区,影响其植被多样性的土壤环境因子不尽一致,其中土壤养分和有效养分在一定程度上起着主导性的影响作用,通过人为干扰区和对照区的相关性系数可知,人为干扰区域和对照区域土壤养分之间均呈极显著正相关,说明土壤系统内部因子处于动态变化和平衡中,在人为干扰下,它们作为相互作用和影响的有机整体表现出统一性和同步性,并没有改变土壤养分因子之间的互作效应,并且土壤全量养分均与其对应的有效养分呈极显著正相关($p < 0.01$),说明其有效养分主要依靠于土壤全量养分。冗余分析的结果显示,对于人为干扰区和对照区,植被与土壤的排序基本没有变化,而人为干扰对土壤养分含量产生了一定的影响,造成二者的 RDA 排序图不相一致,排序轴可反映喀斯特地区土壤因子的梯度变化特征,表明利用土壤养分作为表征喀斯特山地草地土壤—植被关系的敏感性土壤指示因子是可行的。

关键词:喀斯特山地草地; 人为干扰; 土壤养分; 植被多样性

中图分类号:S151.9;S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0020-08

Effect of Human Disturbance on Soil Nutrients and Plant Diversity of Grassland in Karst Mountain

LI Shengping^{1,2,3}, WANG Kelin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The successional rule of vegetation and dynamics of soil nutrients elements under human disturbance were studied in Karst mountain grassland for three years, which would promote the degraded ecosystem restoration and reconstruction in northwest Guangxi. We employed overall and sample quad rate investigation method and took the grassland as control (CK), and studied the relationship between the plant diversity and soil nutrients by correlation analysis and redundancy analysis. The results are as follows: (1) The vegetation coverage, aboveground biomass, richness index and diversity index of grassland in Karst mountain significantly reduced ($p < 0.05$), and human disturbance had no significant effect on evenness index and dominance index, which suggested that human disturbance did not change in fundamental species. (2) The soil bulk density and pH significantly increased ($p < 0.05$), soil water content and soil electrical conductivity reduced.

收稿日期:2016-03-23

修回日期:2016-04-01

资助项目:国家林业局林业软科学项目“中国森林旅游产业理论与实践研究”

第一作者:李胜平(1985—),女,湖南双峰人,博士研究生,研究方向:区域生态及草地生态学。E-mail:Shengping_lee@163.com

通信作者:王克林(1963—),男,湖北老河口人,研究员,博士生导师,主要从事区域生态与农业生态学。E-mail:kelin@isa.ac.cn

(3) The soil nutrients were significantly reduced except the soil phosphorus ($p < 0.05$), indicating that human disturbance had no significant effect on soil phosphorus ($p > 0.05$). The soil available nutrients were more sensitive to the total soil nutrients which the soil available nutrients had a higher range ability. (4) Correlation analysis showed that the soil environmental factors were different in human disturbance area and CK, suggesting that the soil available nutrients and total soil nutrients played a dominant role. All of the soil nutrients had the significant difference by the correlation coefficient in human disturbance area and CK, which illustrated the uniformity of underground ecosystem such as soil nutrients and other various indicators, and they showed unity and synchronicity as an interaction organic whole. And the soil available nutrients had a significant difference from the the total soil nutrients ($p < 0.01$), which indicated the soil available nutrients were mainly depended on the total soil nutrients. (5) Redundancy analysis indicated that the change order of plant and soil were the same in human disturbance area and CK, while the human disturbance had an effect on the soil nutrient, and then resulted in the different RDA figure, and the sorting shaft could reflect the characteristics of the gradient soil factors, which showed that using soil nutrients as the sensitivity of soil indicating factors of Karst mountain grassland soil-vegetation relationship was feasible.

Keywords: Karst mountain grassland; human disturbance; soil nutrients; plant diversity

喀斯特地貌是世界上主要的地貌类型之一,由于其土层发育浅、成土速率低、土壤渗漏性强,岩石界面与土壤之间缺乏风化母质的过渡层,其生态环境极其脆弱,与黄土高原、荒漠、寒漠地区并列为我国四大生态脆弱区^[1-3]。喀斯特生态系统具有生境高度的异质性和复杂性,生态系统对外界干扰显得尤为脆弱和敏感,其抗逆能力、稳定性和自我恢复能力较低^[4-5]。随着社会的发展,人类活动对生态系统及过程的作用越来越明显,人类对土地的利用方式不仅反映了人类对各种土地资源利用活动的结果,还严重影响到生态系统的稳定与可持续发展^[5]。在最近几十年甚至上百年尺度上,人类活动影响产生的环境效应远远超过了由自然因素引起的环境效应,人为干扰已经成为改变生态系统尤其是喀斯特地区极其脆弱的生态系统的主要因素,再加上喀斯特石灰岩山区自然条件恶劣、石多土少、山地多耕地少等因素,部分地区经济发展不平衡,水土流失严重,生态环境日益恶化,形成了长期的恶性循环^[2,5]。

土壤是植物生长的基础,土壤不仅影响植被的发生、发育和演替速度,而且也对生态系统过程、生产力和结构具有重要影响^[6];草地的演替进程同时也丰富了土壤资源,维持了物种间关系、种群的分布格局以及物种多样性^[7]。环境和生态学家们已将“喀斯特”作为世界性的难题予以关注,在人地矛盾尖锐的喀斯特山区,人为干扰直接影响着喀斯特生态系统的演变过程,由于喀斯特独特的地质背景加上生存型经济发展阶段不合理的土地开发方式使该区域生态环境不断恶化,导致喀斯特严重缺水、缺土,自然灾害频繁发生^[2,5]。已有研究表明,喀斯特山区耕作、过度开垦、火烧、过度干扰等方式严重影响了其土壤肥力、种子

库的组成与分布、植被演替及其物种多样性等^[8]。桂西北喀斯特地处西南喀斯特南部的过渡地带,其景观单元为峰丛洼地,伴有大量山地草地,资源短缺,人类通过不断的采伐、开垦、采樵、采矿和旅游开发对本来脆弱的喀斯特生态环境进行不断的破坏,绝大部分森林已经退化成灌丛或者草坡,造成其生境质量严重下降,水土流失严重^[1-2,9];进入20世纪80年代中期,人为干扰显著减少,植被自然恢复了大概30 a,但大部分地区仍持续在草丛和草灌丛阶段^[8,10-11]。近些年有关方面的研究主要集中在自然保护区和土地利用方式上,干扰区植被的恢复和土壤质量变化研究已经相对滞后^[12]。因此,本文选取桂北喀斯特山地草地,从植被多样性和土壤养分特征等方面研究人为干扰对喀斯特山地草地的影响,旨在揭示植被对人为干扰的响应和探讨人为干扰对草地生态系统土壤养分循环的影响机制,为喀斯特山地草地生态系统功能维持、植被恢复和资源合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于云贵高原中段的贵州省晴隆县境内(25°33'—26°11'N, 105°01'—105°25'E),总面积达13.31万hm²,该区属高原峡谷喀斯特地貌类型,地形起伏大,最高海拔2025 m,最低海拔543 m,气候属北亚热带湿润季风气候区,雨热同期,其气候垂直分布差异明显,谷地干热,四季分明,高山凉润。近十年来年降水量1500~1650 mm,年平均气温14~15℃,年均日照时数1462 h左右,无霜期320 d左右,光热资源充足,降水量丰富。研究区域自然资源贫乏,自然植被中乔木层发育欠佳,山地草地发育较

好,保水保肥能力差,生态环境较为脆弱,土壤较为贫瘠,同时干旱、洪涝、冰雹等自然灾害频繁发生,加剧了喀斯特岩溶地貌发育,具有典型的喀斯特地貌^[10]。

1.2 试验设计

1.2.1 样地设置 采用典型样地法对长期围封喀斯特山地草地植被进行调查,采样时间为 2013—2015 年的 9 月中旬,数据为连续 3 a 的平均值(每年定点采样),随机设置 3 个 100 m×100 m 的样地,3 个样地距离 100 m 左右,每个样地设置 20 个 100 cm×100 cm 具有代表性样方,对照选择在围封样地外的草地(CK),在围封外同样设置 3 个 100 m×100 m 的样地,每个样地设置 20 个 100 cm×100 cm 的具有代表性样方,分别统计每个样方内的草地植物物种及密度、盖度及高度,采用多样性指数、丰富度指数和优势度指数 3 个指标,为了保证取样的一致性,所取样的土壤坡度均小于 5°,同时保证其海拔和生境基本一致。物种地上生物量用收割法获取,随机挑选 3 个样方齐地面分物种将植物剪下带回实验室,在 105℃ 下杀青 30 min 后 65℃ 下烘至恒重,称其干重,获取每个样方地上生物量。多样性指数计算公式如下^[13]:

Patrick 丰富度指数(S)

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$

Simpson 优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum (P_i)^2$$

Pielou 均匀度指数(JP):

$$JP = -\sum P_i \ln P_i / \ln S$$

$$JP = H / \ln S$$

式中: S 代表样方内物种数目; P_i 为样方内种的相对重要值;相对重要值(P_i)=(相对覆盖度+相对高度+相对多度)/3。此外,为了比较植被多样性指数间的关系,方差分析和多重比较用来检验它们之间的差异显著性。

1.2.2 土壤样品的测定 在每个样方采用五点取样法,四分法保留 1 kg 左右,取样深度为 0—10,10—20,20—30 cm 混合土样(除去表层的枯落物层),所取土样分为 2 份,一份装自封袋中,测定土壤含水量(烘干法);一份自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 0.5 mm 筛,测定土壤养分及理化性质;环刀法测定土壤容重^[14]。

土壤全碳和全氮采用元素分析仪;速效磷采用 NaHCO_3 浸提—钼锑抗比色法;碱解氮采用 $\text{NaOH}-\text{H}_3\text{BO}_3$ 法;全钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法^[14]。

Excel 2007 和 SPSS 18.0 进行数据统计和方差检验,以平均值±标准误差表示,单因素方差分析

(One-way ANOVA),Pearson 相关系数法分析土壤养分和植被多样性之间的相关性,CANOCO 4.5 分析土壤养分对植被多样性与环境因子的响应^[15]。

2 结果与分析

2.1 人为干扰对喀斯特山地草地植被多样性的影响

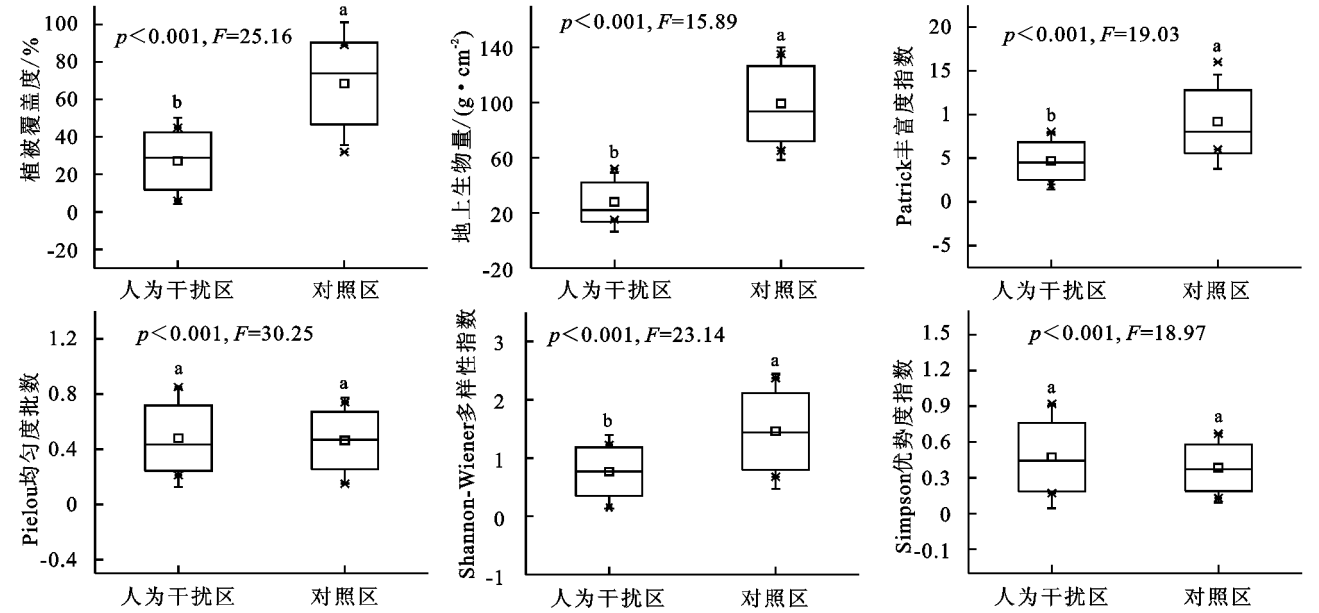
通过分析可知(图 1),人为干扰对喀斯特山地草地植被多样性具有显著的影响,其中人为干扰显著降低了植被盖度、地上生物量、丰富度指数和多样性指数($p < 0.05$),与对照区相比,人为干扰区植被盖度降低了 61.44%、地上生物量降低了 35.12%、丰富度指数降低了 24.35%、多样性指数降低了 36.18%,而人为干扰对喀斯特山地草地植被均匀度指数和优势度指数没有显著影响($p > 0.05$)。人为干扰对草地生境的破坏度较高,一些耐受性差的物种因不适应生境的剧烈变化而被淘汰,因此人为干扰区植被盖度、地上生物量、丰富度指数和多样性指数较低,而人为干扰并没有改变物种在生境中的均匀分布,可能是短期的人为干扰并没有引起喀斯特山地草地物种发生根本性的变化。

2.2 人为干扰对喀斯特山地草地土壤理化性质的影响

由图 2 可知,人为干扰显著增加了土壤容重($p < 0.05$),与对照区相比,土壤容重增加了 52.14%。主要是由于人为的践踏导致土壤通气性变差,使得土壤紧实度增加,土壤容重变大,土壤结构变差,图 2 的结果说明人为干扰对土壤的压实作用更显著,使土壤容重增加。土壤含水量受大气降水蒸发,植物吸收蒸腾及土壤特性等影响是决定植物生长及系统构成的重要指标。人为干扰降低了土壤含水量,与对照区相比,土壤含水量降低了 35.17%。人为干扰一方面显著降低了植被盖度及植被多样性,导致其物种数目降低,土壤入渗和持水能力降低,同时人为的践踏使土壤变得紧实从而降低对水分的渗透与蓄积能力,因而土壤含水量较低。人为干扰强度显著降低了土壤电导率和增加了土壤 pH 值,与对照区相比,土壤电导率降低了 32.15%,土壤 pH 值增加了 23.69%。

2.3 人为干扰对喀斯特山地草地土壤养分的影响

由图 3 可知,人为干扰对土壤养分有很大影响,除了土壤全磷含量以外,人为干扰显著降低了土壤养分($p < 0.05$),土壤养分各指标表现为对照区>人为干扰区,与对照相比,土壤有机碳含量降低了 25.14%,土壤全氮含量降低了 36.87%,土壤全磷含量降低了 9.56%,土壤全钾含量降低了 53.12%,土壤碱解氮含量降低了 42.69%,土壤速效磷含量降低了 39.84%。综合来看,人为干扰对土壤有效养分的降低幅度最大,对人为干扰干扰表现较为敏感。



注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 人为干扰对喀斯特山地草地植被的影响

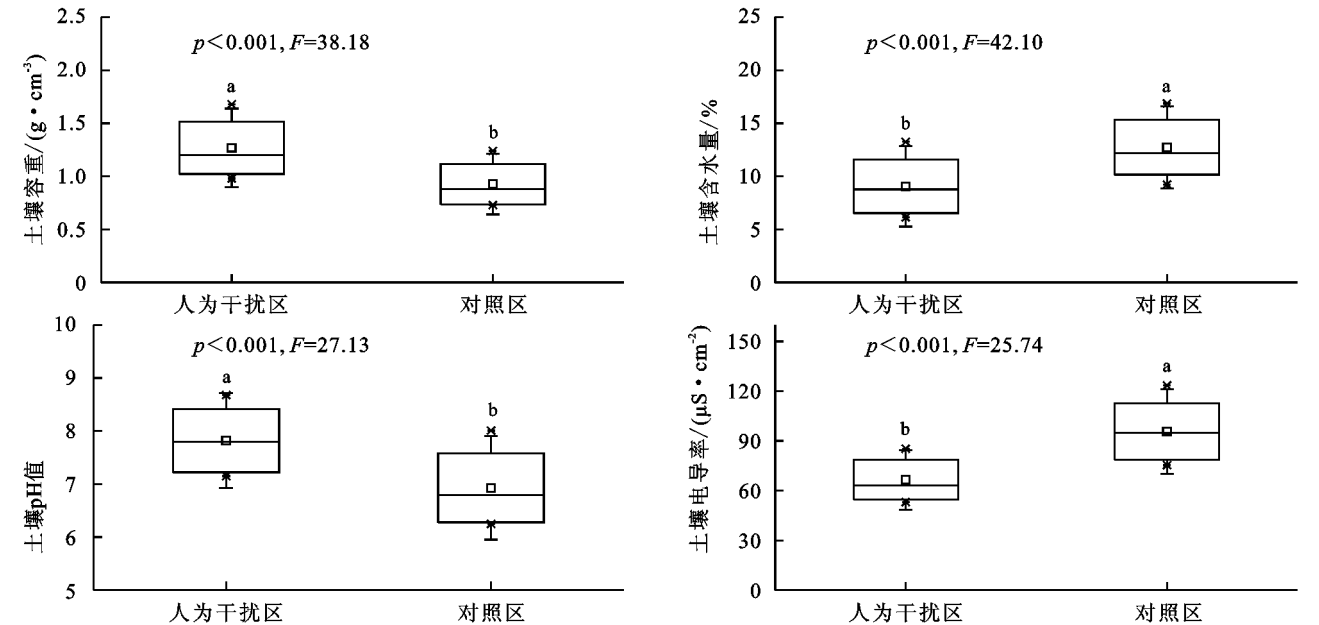


图 2 人为干扰对喀斯特山地草地土壤理化性质的影响

2.4 喀斯特山地草地土壤养分与植被多样性与的相关分析

为进一步研究人为干扰对喀斯特山地草地植被多样性和土壤养分因子之间的关系,将人为干扰和对照区各土壤养分因子与植被多样性分别进行 Pearson 相关分析,结果见表 1,由表可知,对于人为干扰区,喀斯特山地草地植被丰富度指数与 pH 和容重呈显著负相关($p<0.05$),与含水量、全碳、全氮、全钾、碱解氮和有效磷呈极显著正相关($p<0.01$);均匀度指数与全碳、全氮和速效磷呈显著正相关($p<0.05$);多样性指数与 pH 值和容重呈极显著负相关($p<0.01$),与全碳、全氮、全钾和碱解氮呈极显著正相关($p<0.01$),与含水量、全磷和速效磷呈显著正

相关($p<0.05$);优势度指数与 pH 值和容重呈显著负相关($p<0.05$),与含水量、全碳、全钾和碱解氮呈显著正相关($p<0.05$)。对于对照区,喀斯特山地草地植被丰富度指数与含水量、全碳、全氮和碱解氮呈极显著正相关($p<0.01$),与全钾和速效磷呈显著正相关($p<0.05$);均匀度指数与含水量、碱解氮和速效磷呈显著正相关($p<0.05$);多样性指数与 pH 值呈显著负相关($p<0.05$),与全碳、全氮、全钾和速效磷呈极显著正相关($p<0.01$),与电导率、含水量、全钾和碱解氮呈显著正相关($p<0.05$);优势度指数与 pH 值呈显著负相关($p<0.05$),与碱解氮呈极显著正相关($p<0.01$),与含水量、全磷和速效磷呈显著正相关($p<0.05$)。

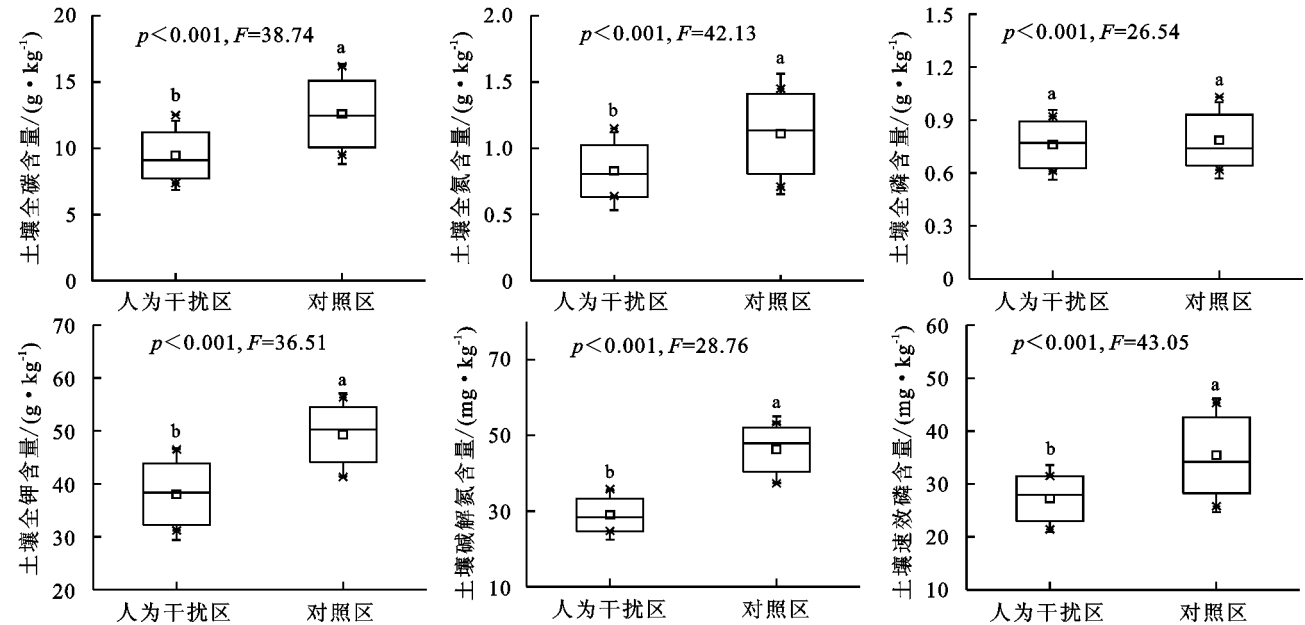


图 3 人为干扰对喀斯特山地草地土壤养分的影响

表 1 植被与土壤因子之间相关分析

项目	土壤特性	植被特征			
		丰富度 指数	均匀度 指数	多样性 指数	优势度 指数
人为 干扰区	pH 值	-0.566 *	-0.035	-0.698 **	-0.562 *
	电导率	0.162	0.258	0.356	0.274
	容重	-0.636 *	-0.356	-0.742 **	-0.536 *
	含水量	0.752 **	0.365	0.569 *	0.652 *
	全碳	0.856 **	0.569 *	0.741 **	0.523 *
	全氮	0.902 **	0.514 *	0.853 **	0.356
	全磷	0.325	0.365	0.623 *	0.454
	全钾	0.744 **	0.025	0.814 **	0.587 *
	碱解氮	0.723 **	0.369	0.745 **	0.532 *
	速效磷	0.813 **	0.503 *	0.635 *	0.214
对照区	pH 值	-0.233	0.056	-0.555	-0.512 *
	电导率	0.156	0.058	0.517 *	0.214
	容重	0.036	0.125	0.365	0.206
	含水量	0.698 **	0.522 *	0.658 *	0.541 *
	全碳	0.745 **	0.479	0.689 **	0.369
	全氮	0.823 **	0.365	0.714 **	0.488
	全磷	0.325	0.026	0.347	0.569 *
	全钾	0.623 *	0.135	0.566 *	0.325
	碱解氮	0.705 **	0.517 *	0.613 *	0.678 **
	速效磷	0.633 *	0.568 *	0.741 **	0.596 *

注：*，** 分别表示在 0.05,0.01 水平上差异显著，n=60。

2.5 人为干扰与植被多样性和土壤因子的 RDA 排序分析

为了尽可能多地把土壤因子指标结合在一起，更好地揭示喀斯特山地草地土壤因子与植被之间的相互关系，本研究采用冗余分析(RDA)方法，将植被丰富度指数、多样性指数、优势度指数、均匀度指数和植

被盖度作为响应变量，土壤养分因子作为解释变量，利用多元统计分析的手段，提取能够明显解释影响植被变化的指标^[15]。由图 4 可知，对于人为干扰区，RDA 排序图的前 2 个排序轴特征值分别为 0.756，0.123，第一排序轴可反映不同植被多样性与土壤因子的梯度变化特征，不同植被多样性与环境因子 2 个排序轴的相关性均为 1.000，前 2 个排序轴的特征值(变量解释率)占到了 99.68%，蒙特卡罗检验分析环境因子对植被多样性的影响达到显著性(第一轴 $p<0.000$ ， $F=8.53$ ；第二轴 $p<0.000$ ， $F=7.12$)，因此，RDA 排序图能够很好地解释环境因子(主要是土壤养分各指标)对植被多样性的影响，同时，排序轴特征值均小于真实的特征值，可以用于解释变异程度。结果显示植被多样性与土壤养分含量均呈正相关；沿着 RDA 的第 1 排序轴，随着显著性影响因子(土壤养分各指标)的增加，丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度逐渐增加，并且丰富度指数、多样性指数、优势度指数和植被盖度与电导率和 pH 值呈负相关，排序轴可反映喀斯特地区土壤因子的梯度变化特征，表明利用土壤养分作为表征土壤—植被关系的敏感性土壤指示因子是可行的。

对于对照区，RDA 排序图的前 2 个排序轴特征值分别为 0.803,0.104(表 2)，第一排序轴可反映不同植被多样性与土壤因子的梯度变化特征，不同植被多样性与环境因子 2 个排序轴的相关性均为 1.000，前 2 个排序轴的特征值(变量解释率)占到了 95.27%，蒙特卡罗检验分析环境因子对植被多样性的影响达到显著性(第一轴 $p<0.000$ ， $F=9.45$ ；第二轴 $p<0.000$ ， $F=8.37$)，因此，RDA 排序图能够很好地解

释环境因子(主要是土壤养分各指标)对植被多样性的影响,同时,排序轴特征值均小于真实的特征值,可以用于解释变异程度。由表 3 看出,植被多样性与土壤含水量、土壤养分含量均呈正相关;沿着 RDA 的第 1 排序轴,随着显著性影响因子(土壤养分各指标)的增加,丰富度指数、多样性指数和植被盖度逐渐增加,而优势度指数随 pH 值的增加而增加。由此可知,在对照区和人为干扰区,植被的排序基本没有变化,而人为干扰对土壤养分含量产生了一定的影响,造成了二者的 RDA 排序图不相一致。

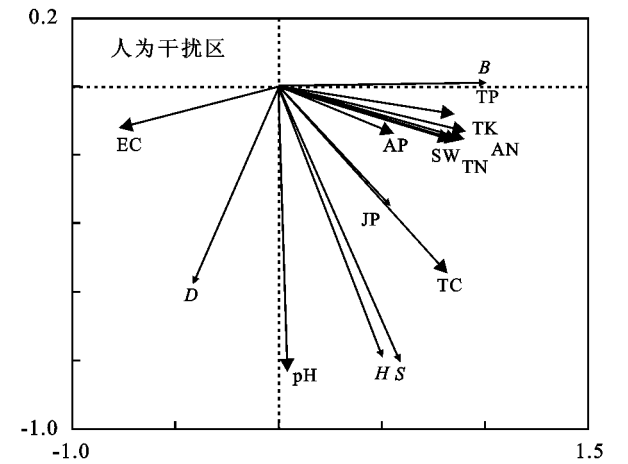
表 2 RDA 排序结果

排序轴	人为干扰区		对照区	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
特征值	0.756	0.123	0.803	0.104
变量累积百分比(%)	75.6	87.9	80.3	90.7
物种数据(%)	75.6	87.9	80.3	90.7
蒙卡罗检验(次)	499	499	499	499
<i>p</i> 值	<0.000**	<0.000**	<0.000**	<0.000**
<i>F</i> 值	8.53	7.12	9.45	8.37
物种—环境相关性	1.000	1.000	1.000	1.000
变量解释	99.68	93.14	95.27	91.05
所有特征值之和	1.000	1.000	1.000	1.000
所有典范特征值之和	1.000	1.000	1.000	1.000

注: * 表示 $p<0.01$, * 表示 $p<0.05$ 。

3 讨论与结论

多样性是植物结构和功能复杂性的度量和结构



注:JP 为均匀度指数;H 为多样性指数;D 为优势度指数;S 为丰富度指数;C 为植被盖度;B 为地上生物量 BD 为土壤容重;SW 为土壤含水量;pH 为土壤 pH 值;EC 为土壤电导率;TC 为土壤全碳;TN 为全氮;TK 为全钾;TP 为全磷;AN 为碱解氮;AP 为速效磷。

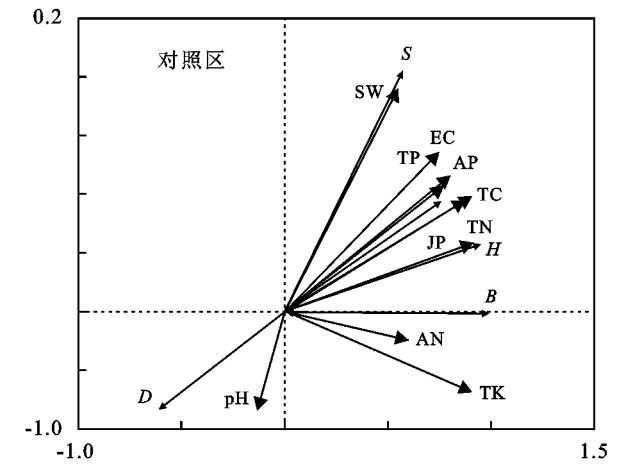
图 4 喀斯特山地草地植被多样性与土壤养分的 RDA 排序图

人为干扰不仅影响喀斯特山地草地的物种组成草地结构,对草地生态系统的土壤物理结构与化学性状也会产生影响。土壤容重可以反映土壤结构的好坏,影响着土壤中水、肥气热等肥力因素的变化和协调,本研究中人为干扰后土壤容重显著增加,说明人

特征的定量指标,表征着生态系统结构复杂性。物种多样性变化与生境紧密相关,生物因子尤其是人为干扰对植物草地物种多样性的改变影响颇大。本研究中人为干扰对其多样性造成了一定的影响,结果显示了人为干扰显著降低了喀斯特山地草地的丰富度指数和多样性指数($p<0.05$),对均匀度指数和优势度指数影响并不显著($p>0.05$),由此可知,人为干扰仅仅降低了草地植被的物种数目,而并没有降低其均匀度和优势植物种类,主要是由于生境因子及物种的生存策略,导致其优势物种并没有改变。从长远利益来看,人为干扰还可能会降低草地生态系统的稳定性,对此,未来应侧重于研究人为干扰条件下草地生态系统多样性稳定及维持机制。

表 3 环境因子与 RDA 排序轴相关系数

土壤参数	人为干扰区		对照区	
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
pH 值	0.145	0.069	0.368	0.156
电导率	0.217	0.324	0.069	0.327
容重	0.352	0.158	0.217	0.458
含水量	0.856**	0.769**	0.795**	0.689
全碳	0.912**	0.317	0.813**	0.935**
全氮	0.887**	0.756**	0.881**	0.889**
全磷	0.314	0.069	0.155	0.356
全钾	0.576	0.687	0.689	0.522
碱解氮	0.698**	0.754**	0.764**	0.638**
速效磷	0.746**	0.832**	0.827**	0.754**



为干扰使土壤物理性状恶化,这与其他学者的结果一致^[16],主要是由于人为干扰导致土壤失去了大中等孔隙,而土壤含水量呈下降趋势,人为干扰导致地表的裸露程度增大,地表蒸发随之增大,土壤水分不易保持,呈下降趋势。同时,植物对土壤的保水能力下

降,土壤的渗透阻力加大,从而导致土壤保水和持水能力下降^[16-17]。人为干扰下土壤 pH 值增加,主要是由于人为干扰造成的植被盖度和地表凋落物量减小,进一步加速了土壤水分蒸发量,使土壤中的部分盐分聚积到土表以及尿素水解过程产生的碳酸根离子与水作用形成大量的氢氧根离子均导致土壤 pH 值升高^[16]。由图 3 可知,人为干扰对土壤养分的影响较为明显,但 4 种营养元素(碳、氮、磷、钾)的变化趋势不同,人为干扰对土壤养分的影响具体表现为降低了土壤碳、氮和钾含量,而磷素并没有明显变化趋势,主要是由于磷素是一种沉积性元素,由母质类型和成土条件决定,在土壤中的存在形式较稳定、不易流失。综合来看,土壤有效养分的变化幅度最大,对人为干扰的扰动表现最为敏感。有研究表明^[15],喀斯特地区土壤对全碳具有保护作用,造成土壤中的有机质大量分解与流失,阳离子也大量流失,石灰土逐渐失去其固碳能力,全碳含量也相应减少。因此,一旦喀斯特地区植被遭到破坏,土壤物理结构受损,全碳会迅速减少,这也是石灰土易退化的主要原因。喀斯特地区植物归还土壤中有有效磷的重要来源,由于植物草地组成和分布格局及土壤自身特性的共同作用,使得土壤磷素变异性较大^[18-19]。喀斯特地区地表产流能力不强,通过地表径流流失的养分很少,而速效养分可以直接为植物所吸收,易溶于水,其受影响因素较多,植物草地分布、地形地貌、降雨强度、耕作方式等对速效养分均有较大影响,因此,人为干扰对其土壤速效养分影响明显。从目前看,对人为干扰引起的土壤化学性质的变化尚无一致性的结论,这主要是由于目前对人为干扰下土壤系统的变化机制缺乏深入细致的探讨,而土壤理化性质的改变又与外界及土壤系统内部多种因素相关联,在不同的干扰类型、干扰强度、不同环境条件及不同的土壤类型下会呈现出不同的变化,人为干扰影响土壤性质的原因究竟与干扰类型有关还是其他因素起作用尚有待于进一步探讨。

大量研究表明人为干扰会降低土壤有机质含量,践踏引起土壤裸露、压实以及枯枝落叶层减少等均会引起土壤有机质含量的降低^[19-20];也有研究表明干扰会造成有机质含量增加,这与干扰效应与干扰类型以及渗入土壤中物质有关^[1,9]。综合图 3 的结果表明人为干扰导致土壤养分及理化性状退化,草地生态系统中植被与土壤之间构成一个相互作用和影响的统一系统,土壤退化会引起植被的变化,而植被的演替也会引起土壤性状的变化,这也是导致草地生物多样性降低的主要原因之一。人为干扰对土壤性质造成的影响程度不同,引起的土壤压实及践踏等加剧了养分

流失,最终将导致土壤结构性质的改变及土壤肥力的下降,并且也可能对植物的生长发育产生一定的负面影响。本研究中人为干扰改变土壤理化性质,减少土壤的养分供给,影响土壤生物活性,对土壤—植物系统产生不利影响。Pearson 相关性分析表明,人为干扰区域和对照区域土壤养分之间均呈极显著正相关,说明土壤系统内部因子处于动态变化和平衡中,草地多样性改变了土壤养分利用策略,在人为干扰下,它们作为相互作用和影响的有机整体表现出统一性和同步性,同时也表明人为干扰对土壤有一定影响,而此影响并没有改变土壤养分因子之间的互作效应,并且土壤全量养分均与其对应的有效养分呈极显著正相关($p < 0.01$),说明其有效养分主要依靠于土壤全量养分。对于人为干扰区和对照区,影响其植被多样性的土壤环境因子不相一致,植被多样性与土壤养分密切相关,是造成该区土壤养分差异的重要原因,其中土壤养分起着主导性的影响作用,主要是因为植物生长产生的枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累、矿化,植物残体腐解过程中所产生酸类物质又促进土壤中难溶性物质向有效方向转化,供植物吸收利用,而土壤养分反过来又促进植物的生长。通过人为干扰区和对照区的相关性系数可知,植被多样性指数均与土壤养分之间呈很好的相关性,而人为干扰在一定程度上更多的对土壤 pH 值和容重起着负的影响作用。这主要是因为人为干扰在一定程度上降低了植被多样性和土壤养分含量,从而增加了土壤容重和 pH 值,降低了其土壤养分的有效性,与此同时,其多样性指数也表征了土壤养分的效果和程度。

本研究利用 RDA 分析手段综合研究了土壤因子与植被之间的关系,不仅能够直观描述出土壤因子间的相互关系,而且能够区分出土壤因子对植被的影响程度,对不同植被变化的贡献率,对其外部环境也呈现出显著的反馈作用^[15]。综合图 4 中环境因子箭头、连线长度和夹角情况,多样性对土壤养分反应均比较敏感,这些敏感指标反映了对其生境的指示作用,也能够表征该区生态系统的敏感性,但还需要深入研究不同植被多样性与生态因子之间的内在联系,进而揭示该区植被分布格局及其对土壤养分的响应。同时研究区域只局限于小尺度空间范围,因此大尺度下的土壤因子与植被的关系有待进一步研究探讨。

草地结构是个体对外界干扰强度、立地条件优劣、环境适应性和多样性的反映,被认为是影响草地物种组成和多样性的最重要因素之一。本研究中喀斯特山地草地在人为干扰下,仍然具有较为稳定的结构和自然更新能力。如何化解人为干扰与保护物种

多样性的冲突,是否要将经营目标转移到生态保护上,摒弃其经济效益。因此,笔者认为草地经营既要满足人类对物质需求,又要能实现草地的永续利用和多功能经营,在欧美发达国家实践成功的“近自然”理念为实现草地多功能经营提供了一条可行途径,其中不排斥获取草地的生产力,与传统经营理论相比,只有实现最合理的近自然状态的草地才能实现经济利益最大化,在发挥草地经济功能的同时,不偏废其生态功能和社会功能。因此,喀斯特山地草地的恢复和营造可借鉴近自然经营方式,降低人为干扰和选择性采伐干扰的强度,重视草地垂直方向上的多样性,最终营造物种多样性水平高、草地结构稳定、整体功能发挥良好的草地环境。

由于喀斯特山地草地生态系统具有滞后性和弹性以及地区的气候环境差异等,导致土壤养分在草地生态系统的转化和循环具有复杂性,并且目前人为干扰强度的定性指标难以定量和制度难以划分,最终导致人为干扰对土壤养分含量影响的研究结果不尽相同^[1-3,9]。从国内外的研究结果来看适度人为干扰对草地土壤生态系统没有负面影响,长期人为干扰会使草地生态系统退化和崩溃,实施合理的人为干扰管理方式使草地生态系统的物质循环与能量流动保持相对平衡才能达到草地资源的可持续发展利用。因此,在未来的研究中应融入相关的环境因子探究人为干扰强度、方式、时间和制度等对草地地上—地下生态系统的响应。就目前的研究,人为干扰主要在较小的时空尺度上表现较为显著,仍然缺乏长期效应,因此这种效应是否能对生态环境造成明显影响在短期内无法明确,未来我们应在较大时空尺度上长期定点研究人为干扰对生态环境的影响及其影响机制。

参考文献:

- [1] 刘淑娟,张伟,王克林,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [2] 曾馥平,彭晚霞,宋同清,等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [3] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势[J]. 地理科学进展, 2011, 19(3): 193-202.
- [4] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(3): 26-30.
- [5] 苏维词,朱文孝. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性分析[J]. 山地学报, 2000, 18(5): 429-434.
- [6] Wang J Y, Yan X Y, Gong W. Effect of long-term fertilization on soil productivity on the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(3): 450-458.
- [7] 柳妍妍,胡玉昆,王鑫,等. 天山南坡中段高寒草地物种多样性与生物量的垂直分异特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 311-318.
- [8] 龙翠玲,余世孝,熊志斌,等. 茂兰喀斯特森林林隙的植物多样性与更新[J]. 生物多样性, 2005, 13(1): 43-50.
- [9] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等. 人为干扰对桂西北喀斯特生态系统土壤有机碳,氮,磷和微生物量剖面分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 164-169.
- [10] 张文,张建利,周玉锋,等. 喀斯特山地草地植物群落结构与相似性特征[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 843-848.
- [11] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2003, 27(3): 26-30.
- [12] 魏媛,张金池,俞元春,等. 退化喀斯特植被恢复对土壤微生物数量及群落功能多样性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(2): 230-235.
- [13] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [14] 王国梁,刘国彬. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.
- [15] 龙健,廖洪凯,李娟,等. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤—石漠化关系研究[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2131-2138.
- [16] 吴海勇,彭晚霞,宋同清,等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 143-147.
- [17] 张伟,陈洪松,王克林,等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.
- [18] Sardans J, Peñuelas J. Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1/2): 1-33.
- [19] Hillel D. Fundamentals of soil physics[M]. Academic press, 2013.
- [20] 张伟,陈洪松,王克林,等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.