

放牧对五台山高山、亚高山草甸植被-土壤系统耦合的影响

江 源^{1,2}, 章异平^{3,2,*}, 杨艳刚^{2,4}, 徐军亮³, 李俞萍¹

(1. 北京师范大学中药资源保护与利用北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 河南科技大学林学院, 河南 洛阳 471003;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:以野外样地调查和室内分析的数据为基础,研究了放牧压力下五台山高山、亚高山草甸植被、土壤的变化特征,并利用灰色系统分析法,从群落和物种两个尺度探讨了放牧对五台山植被-土壤系统耦合的影响。结果表明:随着放牧压力的加大,土壤 pH、有机质和全氮含量呈先下降后上升的非线性变化,在极度退化草甸下达到最大值;灰色关联分析表明土壤有机质和全氮与群落地上生物量、物种多样性、群落总盖度的关联度较高,土壤有机质、全氮对群落特征变化有一定影响;在受到强度干扰时,植物群落优势物种由原生种向退化种发生替代变化。系统耦合度的定量研究表明,现有的放牧强度已经使五台山山地草甸的植被-土壤系统的耦合水平降低。草甸的退化不仅仅是植被与土壤的衰退,也导致两个子系统耦合关系的减弱,使系统表现出相悖的发展趋势。

关键词:过度放牧与退化等级;植被与土壤;系统耦合;灰色关联

Impacts of grazing on the system coupling between vegetation and soil in the alpine and subalpine meadows of Wutai Mountain

JIANG Yuan^{1,2}, ZHANG Yiping^{3,2,*}, YANG Yangang^{2,4}, XU Junliang³, LI Yuping¹

1 Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Protection and Utilization, Beijing Municipality, Beijing 100875, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China

3 College of Forestry, He'nan University of Science and Technology, Luoyang, He'nan, 471003, China

4 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China

Abstract: The subalpine and alpine meadow vegetation of Wutai Mountain, distributed in altitude from about 2400m a. s. l. through to 3061m a. s. l. at the summit, serves as the largest summer mountainous pasture for cattle grazing around the local area in Northern China. The degradation of meadow with different grades owing to overgrazing in different extents has been observed in both vegetation and soil. Considering some features of vegetation, i. e., the coverage, the aboveground biomass, the ratio of annual to biennial plants in species composition, the species richness and the α -diversity index, five grades of meadow degradation relating to different grazing pressure have been recognized in the area through our earlier studies (see Reference No. 8).

This paper, through a grey correlation analysis at both species and community levels, evaluated the system coupling between the vegetation and the soil along with the degradation process in the subalpine and alpine meadow vegetation of Wutai Mountain. 85 sampling quadrat data, which were collected during the field survey in 2006 with the quadrat sized in 1m × 1 m, were involved in the analysis.

The results showed that: (1) The pH-value, the content of total organic matter and the content of total nitrogen in soil

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40871055, 40571001)

收稿日期:2008-11-14; **修订日期:**2009-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhang_yiping1982@yahoo.com.cn

varied nonlinearly among different degraded communities. The values of these soil parameters decreased with the grazing intensification on vegetation first, and then rose rapidly until reached their maximum in the extremely degraded meadow communities, where the vegetation were almost totally destroyed by overgrazing and tramping, while the soil was in a great extent mixed with cattle feces; (2) Showing in the grey correlation analysis, both the soil organic matter and total nitrogen contents correlated significantly with vegetation features represented by the aboveground biomass, the plant species diversity and the coverage at the community level; (3) The soil features coupled strongly with the species group consisted mainly of *Kobresia pygmaea*, *K. pusilla*, *Potentilla nivea* and *Festuca rubra* in the meadow communities influenced by grazing and the slightly degraded meadow communities, whereas in contrast with another group consisted mainly of *Potentilla anserina*, *P. conferta*, *Axyris amaranthoides*, *Polygonum aviculare* and *Cirsium leion* in the extremely degraded communities; (4) The system coupling between vegetation and soil varied on average from the high level with index value at about 0.6—0.8 in the communities before being seriously degraded, to the low level at about 0.4—0.6 in those being extremely degraded, implying that the decrease of the system coupling level between vegetation and soil might therefore be an additive indicator to show the seriousness and extremes of degradation for the subalpine and alpine meadow vegetation.

Key Words: overgrazing and degradation grades; vegetation and soil; system coupling; grey correlation

20 世纪 80 年代末任继周等提出了草地农业生态系统中的耦合问题^[1],近年来国内外学者对草地农业生态系统中的耦合模式和耦合效益开展了广泛而细致的研究,系统耦合问题逐渐成为草地生态学中的研究热点之一^[2]。

放牧通过牲畜的啃食、践踏、排泄干扰草甸环境,使草甸的群落结构发生改变,并且影响着土壤理化性质,有关研究已开展较深入^[3-6]。目前,国内的报道较侧重于放牧对植被或土壤单个系统的影响,而对植被-土壤两系统之间的耦合作用研究较少^[7]。在生态系统中,植被和土壤是相互依存的两个因子,植被影响土壤,土壤制约植被,两者不可分割。所以从植被-土壤耦合系统入手,研究放牧响应机制,能更全面、有效地揭示草地退化机理。

五台山具有较为完好的高山、亚高山草甸生态系统,是华北地区重要的高山夏季牧场。但近年来由于不合理的放牧方式,草甸生产力降低,五台山草甸已经出现了不同程度的退化^[8]。但有关放牧活动对五台山草甸植被-土壤系统耦合的影响研究尚未见报道。针对植被-土壤系统耦合研究中缺乏有效的量化分析方法,本文尝试运用灰色关联分析法,结合野外样方和室内分析的第一手数据,从群落地上生物量、生物多样性、总盖度等方面对五台山不同退化程度生境中植被-土壤系统进行定量化研究,探寻不同退化程度生境下植被-土壤系统耦合的差异及影响因素,期望为深入草地退化机理的研究以及退化草地的恢复提供依据。

1 研究区概况

五台山位于山西省东北部,地处 38°27′—39°15′N, 112°48′—113°55′E 之间,最高峰北台海拔 3061m,号称“华北屋脊”。五台山北部属高寒气候,年均温 -4.2℃,1 月份均温 -18.9℃,7 月份均温 9.6℃,无霜期 50—70d,年平均降水 966.3mm,年均相对湿度 67%。

五台山高山及亚高山草甸主要分布于 2400—3061m 的山顶及缓坡地段。海拔 2800m 以上主要分布着以高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 为优势种的高山草甸群落;海拔 2800m 以下主要分布着以高原嵩草 (*K. pusilla*) 和嵩草 (*K. myosuroides*) 为优势种的亚高山草甸群落^[9]。研究区内的土壤类型为亚高山草甸土和高山草甸土。

2 研究方法

2.1 野外调查及室内分析

五台山夏季放牧期,为便于放养管理,大量牲畜被高密度集中在一起,白天在搭建的石圈附近活动,晚上或暴雨天集中于石圈内,致使局部草甸负荷过重,破坏严重,形成退化斑块,有些地段甚至出现裸地,凡山地相

对平坦之处,几乎都有这种现象发生。

本研究以五台山 2500 m 以上高山、亚高山草甸集中分布的地段为研究区域,以高山嵩草、嵩草、高原嵩草草甸为研究对象,选择放牧活动集中的地段作为调查地,获取草甸退化特征数据,共设置 9 个调查地。每个调查地以放牧干扰最严重的斑块为中心,沿放牧影响梯度由强及弱的方向,布设 3—4 条样带(见图 1),每条样带长度约 100—150m。依据放牧对草甸影响强度变化,在每条样带上设 2—5 个 1m × 1m 的小样方,共调查样方 85 个。

每个样方的调查内容包括:(1)群落物种种类组成、盖度、高度等特征;(2)地上生物量:按 0.5m × 0.5m 内收获地上现存生物量(不分种类),带回室内用烘干法测干重(g/m²);(3)环境因子:主要包括地形、放牧影响强度因子和土壤因子。放牧影响强度因子是以样方中点为中心,记录样方附近 10m × 10m 内的牛马粪堆数(堆/100m²)。土壤特征因子包括土层深度(cm)和紧实度(kPa),取样方内表层土壤充分混合后的样品,带回实验室内按文献^[8]方法分析。

在实验室内,剔除土样中的植物根系及石砾等杂物,在 80℃ 烘干至恒重后过筛,测定土壤 pH 值(电位法),土壤有机质(水合热重铬酸钾氧化法)及土壤全氮含量(凯氏定氮法)3 项土壤理化性质,每一指标 3 次重复,取平均值。

2.2 不同退化等级草甸的划分

应用排序分析方法中的典范对应分析(CCA)对群落在经历放牧后的退化状况进行数量化评价,对比每组样方中优势种变化规律及环境特征,分析不同放牧压力下草甸退化特征,划分出 5 个退化等级,分别是放牧干扰草甸、轻度退化草甸、中度退化草甸、重度退化草甸和极度退化草甸^[8]。

2.3 植被-土壤系统耦合的分析方法

基于生态系统的复杂性,以及人们认识水平的局限性,如植被、土壤等许多因素之间的关系是灰色的,很难用相关系数比较精确的度量相关程度的客观大小。为了克服统计相关分析的种种缺陷,灰色系统理论中的灰色关联分析为人们提供了一种分析因素之间相互关系的方法^[10]。

灰色关联分析是对一个系统发展变化态势的定量描述和比较的方法,其基本思想是,首先确定目标序列和若干比较序列之间的关联系数,在此基础上,结合相对重要性权重,逐层计算各序列和目标序列的关联度。如果比较序列与目标序列的关联度较大,则认为两者的相对变化基本一致,反之,则认为两者变化差异较大。目前,灰色关联法在自然科学和社会科学的很多领域具有十分广泛的应用^[11-13]。本文采用灰色关联分析方法对放牧压力下的植被-土壤系统耦合进行研究。

分析步骤如下:

(1)确定分析序列 本文的目标序列为植被组(X_0),比较序列为土壤序列组(X_i):

$$X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(k)\} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, k 表示指标数,这里表示 85 个样方; i 表示比较序列,即 3 项土壤理化性质(表 1)。

由于系统中各因素的量纲(或单位)不同,为便于比较,采用极差标准化方法对数据进行无量纲化处理。

(2)求关联系数 它是计算关联度和耦合度的基础。

$$\xi_{i(k)} = \frac{\min_{i,k} |X'_{0(k)} - X'_{i(k)}| + \rho \max_{i,k} |X'_{0(k)} - X'_{i(k)}|}{|X'_{0(k)} - X'_{i(k)}| + \rho \max_{i,k} |X'_{0(k)} - X'_{i(k)}|}$$

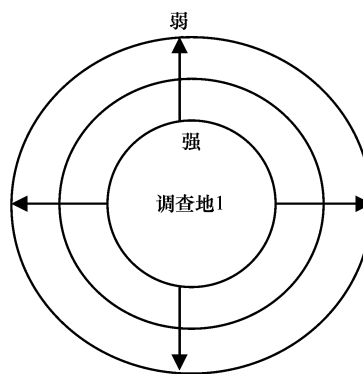


图 1 调查地示意图

Fig. 1 Design of the sampling plot

箭头代表着放牧强度减弱的方向

式中, $i(k)$ 为第 k 个样方植物群落特征 $X_0(k)$ 与第 i 个土壤理化性质 $X_i(k)$ 的关联系数; $\max_k |X'_{0(k)} - X'_{i(k)}|$ 表示目标序列与所有子序列每个指标绝对差值中的最大值; 同理, $\min_k |X'_{0(k)} - X'_{i(k)}|$ 表示目标序列与所有子序列每个指标绝对差值中的最小值; ρ 为分辨系数, 其作用是提高关联系数之间差异的显著性, $\rho \in [0-1]$, 一般取值 0.5。

表 1 植被与土壤系统耦合分析中的指标体系
Table 1 Indexes for the analysis of system coupling between vegetation and soil

耦合系统 System coupling	指标类型 Index types	指标 Indexes
植被 (目标序列) Vegetation (target sequence)	群落指标 Community indexes 物种指标 Species indexes	地上生物量 (X_{01})、物种多样性* (X_{02})、总盖度 (X_{03}) 物种重要值 (X_{04})
土壤 (比较序列) Soil (comparing sequence)	土壤指标 Soil indexes	土壤 pH (X_1)、土壤有机质 SOM (X_2)、土壤全氮 TN (X_3)

* 物种多样性采用 Shannon-Wiener 指数 $H' = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{N_i}{N} \right) \ln \left(\frac{N_i}{N} \right)$

(3) 求关联度和耦合度。将关联系数按样本 k 求其平均值后可以得到一个关联度。

$$r_i = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k \xi_i(k) \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

通过比较关联度 r_i 的大小, 可以分析出植被与土壤系统的关联程度。关联度 r_i 的取值范围是 0—1 之间, 即 $0 < r_i \leq 1$, r_i 值越大, 关联性越大。若 $r_i = 1$, 则说明目标序列植被特征与土壤理化性质的某一指标 X_i 之间关联性大, 变化规律完全相同, 单个指标间的耦合作用非常明显, 反之亦然。

关联度的分级, 罗上华^[11] 在研究城市环境保护与生态建设指标体系时, 通过专家咨询将灰色关联度划分为 4 级; 侯扶江^[7] 等人在研究土壤要素与草地植物重要值时, 同样将其分为 4 级, 划分界点略有不同 (表 2)。结合本文数据和前人的研究, 将植被-土壤系统的关联度划分为 4 级: 以 0.4、0.6 和 0.8 为界, 依次为 $0 < r_i \leq 0.4$ 低关联度 (土壤资源基本不利于其发展的物种)、 $0.4 < r_i \leq 0.6$ 中等关联 (土壤资源基本有利于其发展的物种)、 $0.6 < r_i \leq 0.8$ 较高关联 (土壤资源有利于其发展的物种) 和 $0.8 < r_i \leq 1$ 高关联 (土壤资源最有利于其发展的物种)。

表 2 关联度分级
Table 2 Correlation level defined in terms of the correlation index

方法 1 Method 1 ^[11]		方法 2 Method 2 ^[7]	
关联度 Value of the correlation index	评价描述 Correlation level	关联度 Value of the correlation index	评价描述 Correlation level
0—0.3	低关联, 两系统指标间耦合作用弱	0—0.4	土壤资源基本不利于其发展的物种
0.3—0.6	中等关联, 两系统指标间耦合作用中等	0.4—0.6	土壤资源基本有利于其发展的物种
0.6—0.8	较高关联, 两系统指标耦合作用较强	0.6—0.8	土壤资源有利于其发展的物种
0.8—1	高关联, 两系统指标的相对变化几乎一致, 耦合作用极强	0.8—1	土壤资源最有利于其发展的物种, 此物种可被认为退化草地的显著特征之一

为进一步从整体上判断植被和土壤两个系统耦合的情况, 采用系统关联的耦合度模型, 其计算公式为:

$$C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

3 结果与分析

3.1 不同退化等级草甸的植被特征

随着放牧压力的加大, 五台山草甸植被出现不同程度的退化。放牧导致群落总盖度、地上生物量、多样性指数等群落数量指标降低, 1、2 年生植物所占比例升高, 草甸原生优势物种受到抑制, 并且群落环境因子之间

差异显著。在放牧干扰草甸中,嵩草、高原嵩草和直梗高山唐松草(*Thalictrum alpinum* var. *elatum*)为优势种,轻度干扰草甸中嵩草、高原嵩草(亚高山草甸)或珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、高山嵩草、发草(*Deschampsia caespitosa*)(高山草甸)为优势种,中度退化草甸高原嵩草依然为优势种,重度和极度干扰草甸中优势种被鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)和平车前(*Plantago depressa*)取代^[8]。

3.2 不同退化等级草甸的土壤特征

放牧对土壤的影响主要有两个方面,一方面牲畜的践踏和其排泄物会直接影响土壤的理化性质;另一方面,牲畜通过采食改变植物群落,如植物种类、比例、格局变化等间接影响土壤理化性质。一般认为,土壤对放牧的响应滞后于植被,但有时土壤对放牧的敏感性要高于植被^[6]。

图2表明,从放牧干扰草甸至极度退化草甸,土壤pH、有机质和全氮的变化趋势基本一致,即先下降后上升,在极度退化草甸中3项指标达到最大值,其它退化等级草甸的土壤理化性质差异不大;3项指标的最小值变化略有不同,土壤有机质和全氮在重度退化草甸下最小,土壤pH在轻度退化草甸下最小。根据图2可知,随着退化强度的加大,土壤理化性质变化趋势并非线性的增加或减少,而是先下降后上升的非线性变化特征。

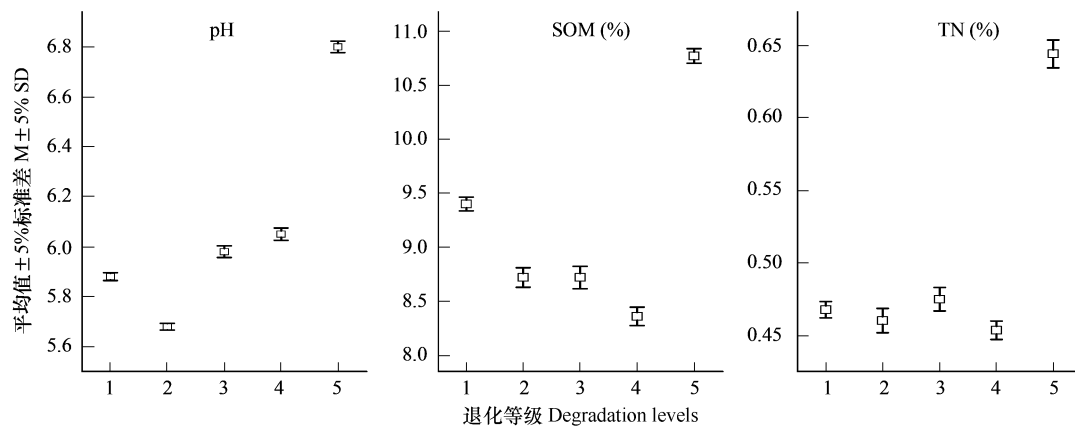


图2 不同退化等级草甸的土壤性质变化

Fig. 2 Soil features within different degradation levels in meadow vegetation

1. 放牧干扰草甸; 2. 轻度退化草甸; 3. 中度退化草甸; 4. 重度退化草甸; 5. 极度退化草甸; 下同

3.3 不同退化等级草甸的植被-土壤系统耦合特征

土壤对植被的灰色关联度的大小直接反映对植被的影响程度,即土壤资源满足植被需求的程度,关联度越大说明植被-土壤系统耦合作用强,反之则说明现有的土壤资源难以满足植被需要的程度^[7]。

3.3.1 从群落尺度分析放牧压力下的植被-土壤耦合关系

为分析不同放牧压力下,植被-土壤耦合关系的变化,从群落尺度选取地上生物量、物种多样性和总盖度3个指标,分析这些群落参数在不同放牧压力下与土壤因子的关联度,探讨放牧对植被-土壤系统的影响。

由图3可知,从地上生物量、物种多样性和总盖度3方面研究植被-土壤系统,其变化规律基本一致,即随着放牧压力加大,植被-土壤系统的耦合度呈先上升后下降的变化趋势。单项土壤指标与群落的关联度(r_i)在不同牧压下的变化趋势与耦合度的趋势基本一致。

地上生物量与土壤理化性质之间的耦合度(图3a, C_{01})从较高关联(0.6—0.8)降低到中等关联(0.4—0.6),在极度退化草甸下降明显。耦合度的最高值出现在轻度退化草甸,这符合Connell的中度干扰假说。土壤pH与地上生物量的关联度偏低且变化趋势不明显;土壤有机质与地上生物量的关联度整体较高,达到0.7左右,但在极度退化草甸下急剧下降,仅为0.45左右,说明此时土壤中的有机质含量与植被需求不一致,较高的有机质含量并未促进草甸的进一步生长;土壤全氮与地上生物量的关联度在不同退化草甸下均能达到0.6以上,氮素含量的高低影响着植物的蛋白质合成,从而制约着地上生物量的高低。

物种多样性是反映群落结构特征的有效指标,是生态系统稳定性的量度。近年来,有人应用灰色理论研究物种多样性与土壤因子的关系^[13-14],并取得了较好的效果。从物种多样性角度分析,不同放牧压力下植被-土壤系统的耦合度(C_{02})变化趋势为先上升后下降,在中度退化草甸下植被-土壤系统的耦合度最大,与图 3 的规律基本一致。土壤有机质与物种多样性的关联度总体较高,但在重度和极度退化草甸中,土壤全氮与物种多样性的关联度最高,而土壤 pH 与物种多样性之间的关联性相对较远。

从总盖度分析不同退化等级下植被-土壤的耦合关系,其耦合度次序为(图 3):中度退化草甸 > 重度退化草甸 > 极度退化草甸 > 轻度退化草甸 > 放牧干扰草甸,这表明中度干扰下,土壤理化性质是影响草甸群落总盖度的主导因子,而在干扰较轻的草甸中,土壤理化性质与群落总盖度的相关性相对较远。在 3 项土壤理化性质中,有机质是影响群落总盖度高低的主要因子,而全氮与 pH 与群落总盖度的相关性较小。

3.3.2 从物种尺度分析放牧压力下的植被-土壤耦合关系

前期研究表明,在不同放牧压力下,五台山草甸植物群落中的主要物种的优势地位发生替代变化。随着放牧压力的加大,家畜喜食的植物如珠芽蓼,在群落中呈现减少的趋势;相反那些家畜不喜食、对家畜践踏适应性强的植物,如鹅绒委陵菜、扁蓄(*Polygonum aviculare*)和平车前等,则表现出逐渐增多的趋势,在草甸退化严重的区域成为群落中的优势种^[8]。分析不同放牧压力下,植物重要值-土壤特征的耦合度变化,研究放牧活动改变的土壤理化性质如何渐进影响植物群落中优势物种的生长,以期从物种角度探索植被-土壤的耦合关系。

图 4 中 36 种优势物种的排列次序是按放牧压力的加大,草甸优势物种所呈现的变化规律排布,即按照放牧干扰草甸的优势种嵩草、高原嵩草、直梗高山唐松草、珠芽蓼逐渐向极度退化草甸的优势种轴藜(*Axyris amaranthoides*)、扁蓄、鹅绒委陵菜的顺序排列。分不同退化等级草甸,以各物种的重要值为目标序列,土壤 pH、有机质和全氮含量为比较序列,计算植物重要值-土壤的耦合度(C_{04})。

根据图 4 可知,在放牧干扰草甸中,与土壤耦合度较高的优势植物为高原嵩草(2)、雪白委陵菜(*Potentilla nivea*)(5)、紫羊茅(*Festuca rubra*)(6)等五台山高山、亚高山草甸的典型优势种,而鹅绒委陵菜(36)、扁蓄(35)、魁薊(*Cirsium leo*)(34)等代表退化的物种耦合度低,说明放牧干扰草甸的土壤性质适合五台山原生物种资源的发展,而较不适合退化物种的发展。与五台山土壤的背景值相比,放牧干扰状态下土壤性质尚未发生太大改变。随着放牧压力的加大,在极度退化草甸中,与土壤性质耦合度较高的优势物种被鹅绒委陵菜、大萼委陵菜(*Potentilla conferta*)(32)、轴藜(33)所取代,而嵩草、高原嵩草等物种的耦合度接近 0.4,根据关联度的划分范围可知,若关联度小于或等于 0.4 的,说明该种土壤资源已基本不利于嵩草、高原嵩草等草甸原生优

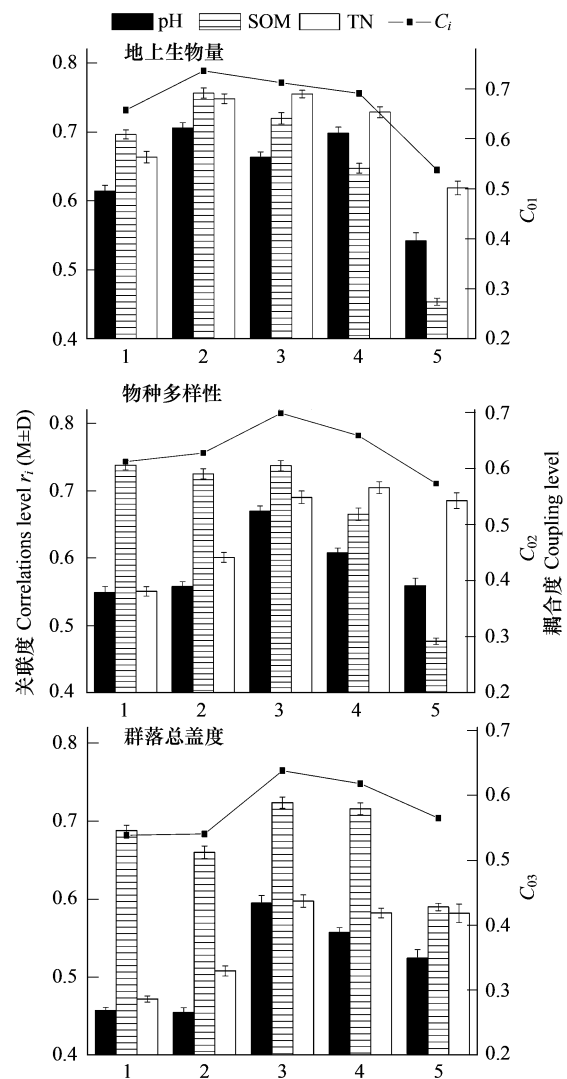


图 3 不同退化等级草甸植被-土壤性质的关联度和耦合度
Fig. 3 Correlation and coupling levels between vegetation and soil features among different degradation levels in meadow vegetation

势物种的发展。

为更直观反映草甸优势物种的变化趋势,按不同退化等级对 36 种优势物种的耦合度(C_{04})进行趋势线拟合。从放牧干扰草甸到极度退化草甸,趋势线的相关系数从负数向正数转变,说明土壤资源与草甸原生优势物种的关联度降低,而与退化物种的关联度升高。由此可见,放牧活动不是单独改变群落物种或单独改变土壤性质,而是影响植被和土壤两个系统的耦合关系。

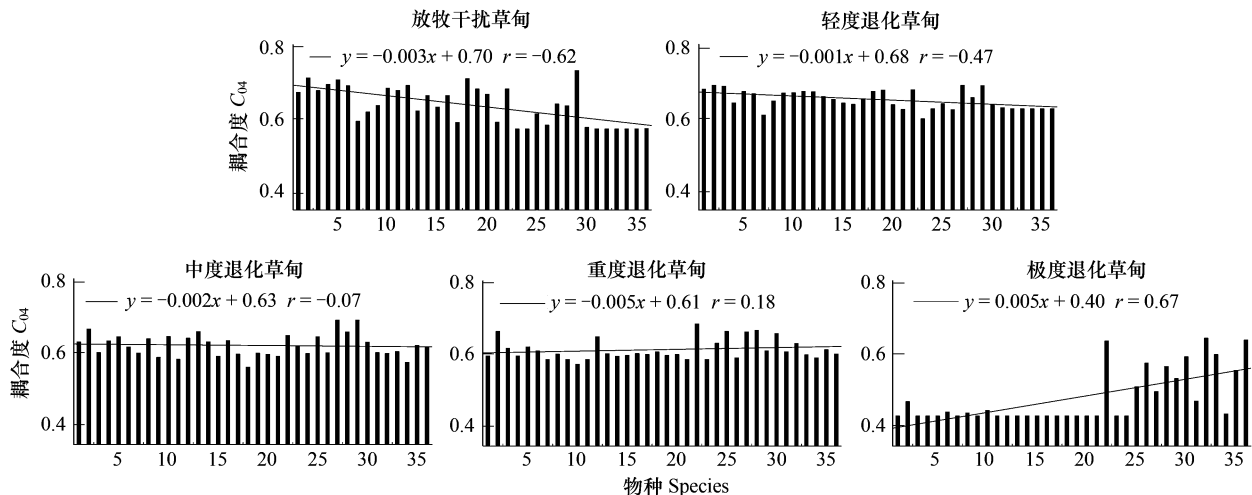


图 4 不同退化程度草甸中主要优势种重要值与土壤性质的耦合度

Fig. 4 Coupling indexes between the Important Value of the main dominant species and soil features among different degradation levels in meadow vegetation

1: 蒿草 *Kobresia myosuroides*, 2: 高原嵩草 *Kobresia pusilla*, 3: 直梗高山唐松 *Thalictrum alpinum* var. *elatum*, 4: 珠芽蓼 *Polygonum viviparum*, 5: 雪白委陵菜 *Potentilla nivea*, 6: 紫羊茅 *Festuca rubra*, 7: 高山嵩草 *Kobresia pygmaea*, 8: 密花岩风 *Libanotis condensata*, 9: 湿地岩黄耆 *Hedysarum inundatum*, 10: 岩茴香 *Ligusticum tachiroei*, 11: 大叶龙胆 *Gentiana macrophylla*, 12: 绢茸火絨草 *Leontopodium smithianum*, 13: 野罂粟 *Papaver nudicaule*, 14: 丛生钉柱委陵菜 *Potentilla saundersiana* var. *caespitosa*, 15: 铃铃香青 *Anaphalis hancockii*, 16: 紫苞风毛菊 *Saussurea purpurascens*, 17: 早生点地梅 *Androsace lehmanniana*, 18: 疏齿银莲花 *Anemone obtusiloba*, 19: 高山紫菀 *Aster alpinus*, 20: 高原毛茛 *Ranunculus tanguticus*, 21: 亚中兔耳草 *Lagotis integrifolia*, 22: 白缘蒲公英 *Taraxacum platyepidum*, 23: 发草 *Deschampsia caespitosa*, 24: 狭苞橐吾 *Ligularia intermediai*, 25: 葛缕子 *Carum carvi*, 26: 早熟禾 *Poa annua*, 27: 洽草 *Koeleria cristata*, 28: 卷耳 *Cerastium arvense*, 29: 百花山鹅观草 *Roegneria turczaninovi* var. *pohuashanensis*, 30: 平车前 *Plantago depressa*, 31: 碱茅 *Puccinellia distans*, 32: 大萼委陵菜 *Potentilla conferta*, 33: 轴藜 *Axyris amaranthoides*, 34: 魁薊 *Cirsium leo*, 35: 扁蓄 *Polygonum aviculare*, 36: 鹅绒委陵菜 *Potentilla anserina*

4 结论与讨论

(1) 放牧对土壤理化性质的影响

放牧时食草动物排泄物的归还使土壤表层速效养分增加,土壤的矿化作用加强,因此表层土壤有机质在特定阶段内可以维持在原有水平或更高水平。放牧会增加土壤有机质^[15-17],是草地退化的重要表征,以往研究对此有较多共识。但也有研究显示,放牧降低土壤有机质含量^[18-19];一些研究表明,放牧加速草地氮循环^[20],重牧尤其如此^[21],另一些研究则显示,放牧降低草地氮的循环速率^[22],抑制土壤氮积累^[23]。

放牧对土壤理化性质的影响较为复杂,并非简单的线性关系,影响土、草、畜的各种因素都有可能对放牧的土壤效应产生一定的影响。本研究中,放牧干扰较轻时,土壤 pH、有机质和全氮的含量较低,而在极度退化草甸下达到最大值。3 项土壤理化性质的最高值出现在极度退化草甸,究其原因主要是:此类草甸是牛马集中活动的场所,粪便数量多,导致土壤表层速效养分增加,且土壤尚未被严重侵蚀,因此养分流失较轻;同时,此类草甸退化严重,植被覆盖度低,致使植物对土壤养分的利用效率降低,有机质的分解变缓,而导致有机质和氮素积累。放牧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加大,从而增加了盐分积累量,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,都致使土壤 pH 升高。如

果这种过度放牧不加以控制,任其发展,经过一定时间,随着侵蚀的加重,土壤中的有效养分将大量流失,土壤将难以提供原生植物正常生长所需的养分,致使植被退化,土壤贫瘠化。

(2) 土壤因子与群落多样性、地上生物量、总盖度的关系

群落尺度的灰色关联分析表明,五台山土壤因子与植被之间有相关性,其中群落地上生物量、物种多样性和总盖度与土壤有机质、全氮的相关性较高,因此五台山山地草甸在不同放牧压力梯度上,土壤有机质、全氮的变化能在一定程度上反映群落地上生物量、物种多样性和群落总盖度的变化。

土壤有机质主要来源于植物地上部分的凋落物以及地下的根系,因此草甸群落盖度越高,植物物种组成越丰富,相应凋落物种类越丰富,有机质含量相应也就越高,因此有机质的高低可以直接反映生物多样性大小;全氮含量与有机质含量有显著的相关性,而且土壤中的 N 素对植物生理和生长影响很大。因此,土壤有机碳和全氮的水平是度量草地生态系统功能恢复与维持的关键指标之一,也是影响植物分布、植物功能群组成和群落物种多样性的重要因素。刘世梁^[24]对东灵山的生物多样性研究显示,土壤因子与生物多样性因子之间存在明显的数量关系,土壤有机质的含量是指示土壤肥力的一个敏感性指标;王长庭^[3]的研究表明,放牧干扰下的高寒草甸土壤,随着孕育土壤根系的基质量减少,归还土壤中有机质的数量逐渐减少,草地发生逆向演替,表现在:物种数减少、多样性下降、能量的分配转向地下;在半干旱地区,生物多样性除了受土壤水分状况的影响,还与土壤速效氮呈正相关^[4]。本研究仅对土壤全氮含量养分与物种多样性关系进行了研究,土壤速效养分与植物群落的相互关系,需要更进一步的研究加以揭示。

土壤 pH 与地上生物量、物种多样性、群落总盖度的灰色关联度表明:土壤 pH 对群落尺度的植被-土壤相关性解释能力有限,这与吴彦^[5]、杨晓晖^[4]等人的研究结果一致。但也有研究显示土壤酸碱度对植物的生存和生长有重要意义^[25],土壤酸性增加(pH 6.3—5.0),多样性上升^[26]。

(3) 放牧对植被-土壤系统耦合的影响

从群落和物种两个尺度分析放牧压力下植被-土壤系统耦合关系的变化,研究表明:放牧强度已经改变了五台山山地草甸的植被-土壤系统,两者的系统耦合水平降低。放牧通过影响土壤理化性质来改变草甸地上生物量、物种多样性等群落特征,并在受到强度干扰时,草甸群落的主要物种的优势地位发生明显的替代变化。

系统耦合可以导致生产效益的放大^[2],使得群落相对具有更大的生产潜力。但是当系统耦合降低,发生系统性的结构不完善结合和由此导致的功能的不协调运行时,即为系统相悖。系统耦合与系统相悖是一个问题的两个方面,是互为相反的生态过程。可以说系统相悖是草地退化的根本原因,在人类活动不合理的干预(如长期超载过牧)下,系统相悖往往愈演愈烈,阻碍了系统耦合作用,如果这种相悖不能得到有效控制,就会使植被子系统与土壤子系统的耦合关系丧失,使生态系统本身的生态危机加重,其发展结果即为草地退化^[27],表现为植被覆盖度降低,地表裸露,植物优势物种发生更替。

目前,整个研究区内由于不合理的放牧方式已经导致植物群落结构及生产力的改变,放牧活动改变的土壤理化性质进一步制约着优势物种由高山、亚高山典型种被退化种替代,五台山草甸出现的严重退化问题亟待解决。

References:

- [1] Ren J Z, Ge W H, Zhang Z H. Establishment of prataculturae system -Outlet of grassland animal husbandry. Grassland Science, 1989, (5): 1-3.
- [2] Lin H L, Hou F J. Research progress and trends in system coupling and discordance for grassland agroecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (6): 1252-1258.
- [3] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Cao G M, Shi J J, Du Y G. Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under disturbance on an alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4144-4152.
- [4] Yang X H, Zhang K B, Hou R P, Ci L J. Vegetation variation under different exclusion measures and their correlation to soil factors. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3212-3219.

- [5] Wu Y, Liu Q, Qiao Y K, Pan K W, Zhao C M, Chen Q H. Species diversity changes in subalpine coniferous forests of different restoration stages and their effects on soil properties. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(6): 648-655.
- [6] Hou F J, Yang Z Y. Effects of grazing of livestock on grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 244-264.
- [7] Hou F J, Nan Z B, Xiao J Y, Chang S H. Characteristics of vegetation, soil, and their coupling of degraded grasslands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 915-922.
- [8] Zhang Y P, Jiang Y, Liu Q R, Tao Y, Wang G R. Degradation features of alpine and subalpine meadows under grazing pressure Mt. Wutai. *Resources Science*, 2008, 30(10): 1555-1563.
- [9] Liu T W. *Flora of Shanxi*. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 2004: 141-165.
- [10] Xu J H. *Mathematical methods in modern geography*. Beijing: Higher Education Press, 1994: 197-199.
- [11] Luo S H, Ma W C, Wang X R, Yong Y, Yu Q. A case study on indicator system of urban environmental protection and ecological construction. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 45-55.
- [12] Liu Y B, Li R D, Song X F. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in Cina. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 237-247.
- [13] Yang Y H, Chen Y N, Li W H. Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjing China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 602-611.
- [14] Zhao H, Cui B S, Bai J H, Ren H L. Effects caused by highway construction on soil-vegetation system of roadsides in longitudinal range-gorge region. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(11): 176-184.
- [15] Reeder J D, Schuman G E. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-rd mixed-grass and short-grass rangeland. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 457-463.
- [16] Schuman G E, Reeder J D, Manley J T, Hart R H, Manley W A. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed-grass rangeland. *Ecological Applications*, 1999, 9(1): 65-71.
- [17] Wienhold B J, Hendrickson J R, Kam J F. Pasture management influences on soil properties in the Northern Great Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(1): 27-31.
- [18] Dormaar J F, Smoliak S, Willms W D. Distribution of nitrogen fractions in grazed and ungrazed fescue grassland Ah horizons. *Journal of Range Management*, 1990, 43(1): 6-9.
- [19] Greene R S B, Nettleton W D, Charters C J, Leys J F, Cunningham R B. Runoff and micromorphological properties of grazed haplargid, near Cobar, NSW, Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(1): 87-108.
- [20] Frank D A, Evans R D. Effects of native grazers on grassland N cycling in Yellowstone National Park. *Ecology*, 1997, 78(7): 2238-2248.
- [21] Unkovich M, Sanford P, Pate J, Hyder M. Effects of grazing on plant and soil nitrogen relation of pasture-crop rotations. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1998, 49(3): 475-486.
- [22] Ritchie M E, Tilman D, Knops J M H. Herbivore effects on plant and nitrogen dynamics in oak Savanna. *Ecology*, 1998, 79(1): 165-177.
- [23] Severson K E, DeBano L F. Influence of Spanish goats on vegetation and soils in Arizona chaparral. *Journal of Range Management*, 1991, 44(2): 111-117.
- [24] Liu S L, Ma K M, Fu B J, Kang Y X, Zhang J Y, Zhang Y X. The relationship between landform, soil characteristics and plant community structure in the Donglingshan Mountain region, Beijing. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 496-502.
- [25] Van Breemen N, Finzi A C. Plant-soil interaction: ecological aspects and evolutionary implications. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 1-19.
- [26] An S Q, Wang Z F, Zhu X L, Hong B G, Zhao R L. Effects of soil factors on species diversity in secondary forest communities. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 1997, 15(2): 143-150.
- [27] Ren J Z, Zhu X Y. The pattern of agro-grassland system and system discordance in Hexi Corridor of China: the mechanism of grassland degradation. *Acta Prataculture Sinica*, 1995, 4(1): 69-80.

参考文献:

- [1] 任继周, 葛文华, 张自和. 草地畜牧业的出路在于建立草业系统. *草业科学*, 1989, (5): 1-3.
- [2] 林慧龙, 侯扶江. 草地农业生态系统中的系统耦合与系统相悖研究动态. *生态学报*, 2004, 24(6): 1252-1258.
- [3] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 曹广民, 施建军, 杜岩功. 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*, 2008, 28(9): 4144-4152.
- [4] 杨晓晖, 张克斌, 侯瑞萍, 慈龙骏. 半干旱沙地封育草场的植被变化及其与土壤因子间的关系. *生态学报*, 2005, 25(12): 3212-3219.
- [5] 吴彦, 刘庆, 乔永康, 潘开文, 赵常明, 陈庆恒. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(6): 648-655.

- [6] 侯扶江, 杨中艺. 放牧对草地的作用. 生态学报, 2006, 26(1): 244-264.
- [7] 侯扶江, 南志标, 肖金玉, 常生华. 重牧退化草地的植被土壤及其耦合特征. 应用生态学报, 2002, 13(8): 915-922.
- [8] 章异平, 江源, 刘全儒, 陶岩, 王耿锐. 放牧压力下五台山高山、亚高山草甸的退化特征. 资源科学, 2008, 30(10): 1555-1563.
- [9] 刘天尉. 山西植物志. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 141-165.
- [10] 徐建华. 现代地理学的数学方法. 北京: 高等教育出版社, 1994: 197-199.
- [11] 罗上华, 马蔚纯, 王祥荣, 雍怡, 余琦. 城市环境保护规划与生态建设指标体系实证. 生态学报, 2003, 23(1): 45-55.
- [12] 刘耀彬, 李仁东, 宋学峰. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报, 2005, 60(2): 237-247.
- [13] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 602-611.
- [14] 赵慧, 崔保山, 白军红, 任华丽. 纵向岭谷区高速公路对沿线土壤-植物系统的影响. 科学通报, 2007, 52(11): 176-184.
- [24] 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 康永祥, 张洁瑜, 张育新. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. 植物生态学报, 2003, 27(4): 496-502.
- [26] 安树青, 王峥峰, 朱学雷, 洪必恭, 赵儒林. 土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响. 武汉植物学研究, 1997, 15(2): 143-150.
- [27] 任继周, 朱兴运. 中国河西走廊草地农业的基本格局和它的系统相悖-草原退化的机理初探. 草业学报, 1995, 4(1): 69-80.