

青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征

郭正刚^{1 2} 牛富俊² 湛 虎¹ 吴青柏²

(1. 兰州大学草地农业科技学院 农业部草地农业生态系统学重点开放实验室, 兰州 730020 ;
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要 :多年冻土的发育是青藏高原冻土区生态系统稳定的基础 ,而多年冻土退化效应是目前青藏高原研究的热点。研究了青藏高原北部多年冻土退化过程中生态系统的变化特征。结果表明 :在多年冻土退化的过程中 ,土壤温度逐渐升高 ,土壤含水量下降 ,有机质含量降低 ,植被类型表现为从沼泽化草甸演替为典型草甸 ,草原化草甸 ,最终成为沙化草地 ,群落植物组成从湿生或中湿生逐渐向中生、中旱生乃至旱生转变 ,草层高度变矮 ,植被盖度下降 , α 和 β 多样性均表现为先增加后减小 ,在草原化草甸阶段达到最大 ,草地植物生物量和载畜能力总体表现为降低趋势 ,但在典型草甸和草原化草甸之间差异不显著。植被经济类群的变化趋势表现为优良的莎草科和禾本科牧草比例下降 ,而毒杂草比例显著增加 ,牧草品质下降 ,饲用价值降低。

关键词 :多年冻土退化 ,冻土环境 ,植物多样性 ,群落组成 ,草地生产力

文章编号 :1000-0933 (2007) 08-3294-08 中图分类号 :Q143 文献标识码 :A

Changes of grassland ecosystem due to degradation of permafrost frozen soil in the Qinghai-Tibet Plateau

GUO Zheng-Gang^{1 2} , NIU Fu-Jun² , ZHAN Hu¹ , WU Qing-Bo²

1 Key Laboratory of Grassland Agro-Ecosystem Ministry of Agriculture , College of Pastoral Agricultural Science and Technology , Lanzhou University , Lanzhou 730020 , China
2 State Key Laboratory of Frozen Soil of Engineering , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730020 , China
Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3294 ~ 3301.

Abstract : Effect of permafrost degradation on grassland ecosystem has aroused interests in the scientists due to influence the processes of ecology in the permafrost regions of Qinghai-Tibetan Plateau. To gain insight into the contribution of permafrost degradation to the stability of grassland ecosystem , there is an urgent need to study the properties of grassland ecosystem in the succession stages due to degradation of frozen soil.

A survey of plant vegetation was undertaken during 2003 and 2004 along the Qinghai-Tibetan Highway from Kunlunshan (94°04' 46 "E , 35°38' 51" N) to the southern Tanggulashan Pass (33°07. 120'E , 91°52. 670'N) , to study the properties of grassland ecosystem in the successional stages from marsh meadow , alpine meadow and steppe meadow to

基金项目 :国家自然科学基金资助项目 (40471032 , J0130084) ;中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室开放资助项目 (DTGC-2005-06)

收稿日期 :2006-06-01 ;修订日期 :2007-03-30

作者简介 :郭正刚 (1973 ~) ,男 ,甘肃岷县人 ,博士 ,副教授 ,从事生态环境建设研究。E-mail :zhenggangguo200@yahoo. com. cn

Foundation item :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471032 , J0130084) and Opening Foundation of State Key Laboratory of Frozen Soil of Engineering (No. DTGC-2005-06)

Received date 2006-06-01 ; **Accepted date** 2007-03-30

Biography :GUO Zheng-Gang , Ph. D. , Associate professor , mainly engaged in ecological environment construction. E-mail :zhenggangguo200@yahoo. com. cn

desert steppe due to permafrost degradation. Fifty-five spots were selected in the successional community series. Each plots were arranged with three replicates. In each subplot , all plant species present were counted , and coverage , height (50 plants) and frequency were recorded. Biomass was measured by harvesting and drying. The species diversity of the plant communities was calculated using the Shannon-Wiener (diversity) index (H) , the Pielou (evenness) index (J) , and richness index (species number) (S) . Three soil samplings at 0 — 20 cm layer were collected to analysis the soil organic matter content. Soil water and temperate were measured.

Accompanying by permafrost degradation , plant species in communities transferred from wet plants in marsh meadow to drought plants in desert steppe , and height and coverage of plant communities decreased , and the richness species index (S) was not significantly different among the successional communities series , whereas evenness index (J) and diversity index (H) were significantly different ($P < 0.05$) , indicating that they first decreased and then increased , peaking in the steppe meadow. In the successional series resulted from permafrost degradation , biomass and carrying capacity generally decreased , however , they were not significantly different between alpine meadow and steppe meadow. Economic value of plants decreased , and weeds in plant communities increased in the sucessional series. Accompanying by the process of frozen soil degradation , soil temperate at 0 — 20 cm layers increased , however , soil moisture and soil organic matter reduced. These implied that permafrost degradation was disadvantageous to stability of grassland ecosystem in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau.

Key Words : degradation of permafrost frozen soil ; permafrost environment ; plant diversity ; communities ' composition ; grassland productivity

多年冻土是地质历史和气候变迁背景下受区域地理环境、地质构造、岩性、水文和植被特征等因素共同影响下通过地气间物质和能量交换而发育的客观地质实体 ,有着独特的自身演变规律 ,对环境变化极为敏感^[1] ,它的发育与完好保存是维持青藏高原生态平衡的物质基础^[2] ,因此多年冻土的状态及其变化对青藏高原生态环境的演变具有决定作用。在多年冻土地带内 ,季节性活动层中的水分受其下部不透水的多年冻土层阻隔 ,成为植被可利用水分的主要来源 ,也是沼泽化草甸与沼泽湿地发育的必要的条件^[3] 。在自然状态下 ,多年冻土生态系统虽然对外界轻微扰动具有一定的自身负荷能力^[4] ,但由于全球变暖和人类频繁的活动 ,导致多年冻土环境发生剧烈变化 ,严重时引发多年冻土退化 ,而多年冻土的退化改变了区域的水文地质和水文条件^[5] ,使植被逆向演替^[2,3] ,植物群落组成会发生相当大的变化^[6,7] ,新物种 (原生群落中不存在) 的入侵和部分种的消失 (原生群落中丢失) 往往改变植物群落中功能多样性 ,而这种改变经常会导致草地生态系统结构和功能的改变 ,从而影响整个区域的生态过程 ,对本区及其毗邻地区的生物 ,以及生物与环境相互作用组成的生态系统产生深刻影响^[8~10] 。研究表明^[2,11] ,随多年冻土的退化 ,冻土上限下降 ,土壤表层水分疏干 ,使沼泽化草甸向典型草甸演替 ,一些水生或湿生植物消失 ,代之以中生或旱生植物 ;冻土继续退化 ,土壤继续疏干 ,则旱生植物成分侵入 ,植被向高寒草原化草甸演替 ,气候持续暖干化 ,冻土消失 ,植被将发生显著退化 ,中生草甸植被基本消失 ,旱生植物得以发展 ,植被出现沙化。分析冻土退化过程中植物群落组分、多样性、草地生产力和经济类群的变化特征 ,揭示土壤温度、含水量和有机质的变化规律 ,对阐明冻土生态系统在冻土退化过程中长期忍受极端环境胁迫的稳定性具有重要的意义。

1 研究地区概况及方法

1.1 研究区概况

研究地区位于青藏高原腹地昆仑山口 (94°04′ 46″E , 35°38′ 51″N ;海拔 4803 m)到唐古拉山口南坡 (33°07. 120′E 91°52. 670′N ;海拔 4 617 m)地带 ,海拔 4300 ~ 49010 m。属高原亚寒带半干旱气候 ,如五道梁 (35°13′N 93°05′E)的年降水量为 262 mm ,年平均气温为 - 5. 6 ℃ ,≥0 ℃ 的年积温为 450 ℃^[15] 。由于喜马拉雅山阻挡印度洋来的西南季风进入高原 ,使该区气候寒冷 ,年仅冬、夏 2 季 ,冬季严寒漫长 (达 7 ~ 8 个月) ,

夏季凉爽短促,牧草生长期 3~4 月^[12]。

1.2 样地设置与调查

本研究采用空间序列代替时间序列的方法,研究多年冻土过程中生态系统的变化特征。王根绪等^[11]认为,随着多年冻土退化的持续退化,植被类型的原生演替模式为:从沼泽化草甸依次演替为典型草甸、草原化草甸和沙化草地。本研究沿青藏公路沿线选择典型草地类型设置样地。选择样地时尽量保持样地海拔、坡向、地表基况的一致性。其中沼泽化草甸设置样地 17 个,典型草甸和草原化草甸分别为 10 个,沙化草地设置 18 个,共计样地 55 个,用 GPS 测定样地的海拔和经纬度。在每个样地内,分别设置 1 m×1 m、2 m×2 m、2 m×4 m、4 m×4 m 的样方,重复 3 次。植被调查以小样方为单位,调查内容包括种类组成、群落总盖度、每个物种的覆盖度、每个物种的平均高度(50 株)、频度以及地上生物量等。

1.3 测定的指标

α 多样性用丰富度指数(S)、Shannon-Wiener 指数(H')和 Pielous 均匀度指数(J')测定, β 多样性用 Whittacker 指数(β_{ws})测定^[6,7]。

载畜量采用文献^[14]提供的公式计算。

每个样地内随机的挖 3 个 20 cm×40 cm×20 cm 的坑,用 TDR 测定从 4 个方向分别测定土壤深 20 cm 处的含水量和土壤温度(温度计)。测定时将 TDR 和温度计的探针直接插入土壤读数并记录。同时将 0~20 cm 层的土样取出,带回实验室采用常规方法测定有机质含量。

野外调查分别于 2003 年 7 月和 2004 年 8 月进行。

1.4 数据分析

采用 SRATISTIC 软件包分析方差和计算标准误,Excel 制图。

2 结果与分析

2.1 多年冻土环境的变化

2.1.1 土壤含水量的变化

土壤含水量是多年冻土环境的主要组分,含水量的高低影响冻土的存在和保育。土壤含水量依赖于植被类型和土壤特性,但反过来是决定不同植被蒸散量的关键因素,因此土壤水分是连接气候变化和植被覆盖动态的关键因子^[9]。在冻土退化过程中,群落间土壤表层水分的变化非常明显,总体趋势呈土壤表层含水量越来越少(图 1),并在不同的演替阶段达到显著水平。主要原因是冻土可以有效阻止地表水分和土壤水分下渗迁移,使植被根系层维持较高水分,而冻土退化过程中由于冻土层下移,导致对生草土层之下的地下水之顶托作用弱化,地下水位也随之下降,造成冻土层以上土壤干化。

2.1.2 土壤表层温度的变化

土壤温度是决定冻土保存是否完好的重要因素之一,因此多年冻土退化过程中土壤温度的变化特点具有重要的意义。统计结果表明,伴随着多年冻土的退化过程,典型草甸阶段的土壤温度显著高于沼泽化草甸阶段的土壤温度(图 2),这主要是因为冻土逐渐消失,土壤表层失去维系活动层低温的能力^[9];地表积水的消失,使水体调节温度的作用减弱,同时地下水位的下降,土壤表层水分含量减少,使单位时间内土壤蒸散量减少,从而使由于蒸散损失的热量减少,导致地温升高。典型草甸阶段和草原化草甸阶段的土壤温度差异不显著,在这两个阶段,植被盖度差异较小,使植被蒸腾和地面蒸散活动变化较小,因此土壤温度变化不显著。到

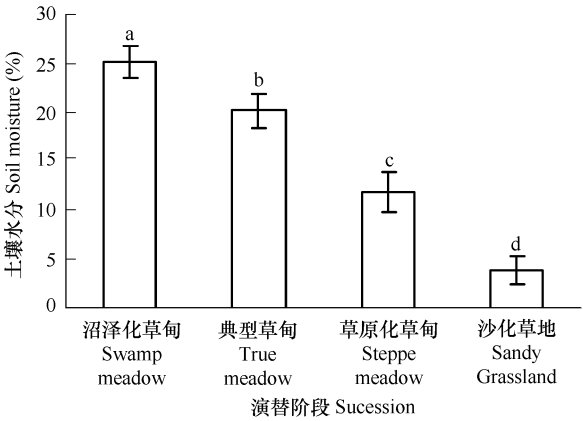


图 1 多年冻土退化时不同演替阶段土壤表层含水量的变化
Fig. 1 Changes of soil moisture at 0-20 cm layers in the succession stages of grassland due to permafrost degradation

达沙化草地阶段,土壤表层温度显著升高,这主要是由于当草原化草甸变化成沙化草地时,植被变得稀疏,地表覆盖度下降,植被蒸腾减弱,散热量减少,使土壤温度升高。

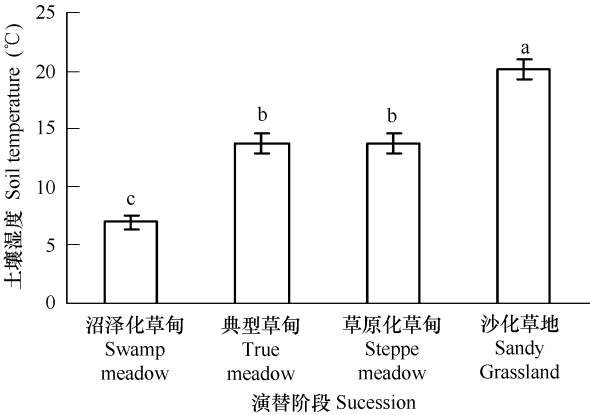


图2 多年冻土退化时不同演替阶段土壤温度的变化
Fig. 2 Changes of soil temperate at 0—20 cm layers in the succession stages of grassland due to permafrost degradation

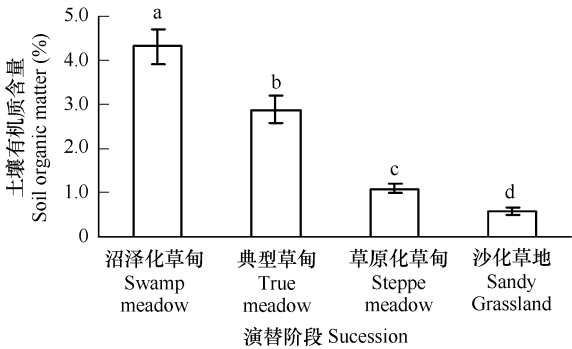


图3 多年冻土退化时不同演替阶段土壤有机质含量的变化
Fig. 3 Changes of soil organic matter at 0—20 cm layers in the succession stages of grassland due to permafrost degradation

2.2 土壤有机质的变化

多年冻土退化过程中,土壤有机质含量显著下降(图3),沼泽化草甸的土壤有机质含量分别是草原化草甸和沙化草地的5倍和7倍。在沼泽化草甸阶段,多年冻土层的存在能有效阻止地表水和土壤水分的下渗迁移,植被根系层处土壤水分始终维持在较高水平,活动层淋溶或淋滤的多种营养成分聚集在此,使有机质在土壤低温条件下大量积累^[21]。到典型草甸阶段,冻土活动层加深,多年冻土上限的下降,使得冻土活动层中水分向下迁移,近地表层土壤水分含量明显降低,地表变干^[20]。同时,土壤温度升高使土壤有机质分解加快,有效养分含量增加,植物营养改善,但有机质含量下降。随着多年冻土的持续退化,植被根系分布区土壤含水量不断降低,土壤温度不断升高,微生物活性增加,分解有机质速率增加,使土壤有机质不断下降。

2.3 群落组成和多样性的变化

2.3.1 群落组成和结构的变化

伴随着多年冻土的退化,植物群落原生演替的阶段依次为沼泽化草甸,典型草甸,草原化草甸和沙化草地^[6,11]。沼泽化草甸的建群种为藏嵩草(*Kobresia tibetica*),由耐寒湿生和湿中生多年地面芽和地下芽植物组成,以莎草科,禾本科和毛茛科植物为主。随着多年冻土的退化,土壤表层含水量下降,一些中生植物的入侵和发展,使群落结构发生了变化,群落演替为矮嵩草(*K. humilis*)为优势种的典型草甸。冻土的进一步退化,土壤表层含水量继续下降,群落的优势植物演变成变小嵩草(*K. pygmaea*),异针茅,紫花针茅等入侵,群落演替进入草原化草甸阶段,湿生植物的消失,草原植物出现。随着冻土继续退化或消失,植物生境极度干旱化,中生草甸植物消失,耐旱植物得以充分发展,逐渐退化发展成为沙化草地,这时耐旱植物占据绝对优势。在群落演替的过程中,物种总体变化趋势表现为旱生和中生物种逐渐增多,而水生和湿生种逐渐减少。物种更替使植物在资源谱上的利用能力发生变化。小嵩草对土壤水分和光照的利用能力小于矮嵩草,而后者又小于藏嵩草^[15]。群落结构也发生明显的变化,草层高度从沼泽化草甸、典型草甸和草原化草甸依次降低,但到沙化草地阶段略有升高。植被覆盖度表现为逐渐减少。草被拦截的降雨量及其覆盖度成正比,草被的拦截有效地降低了雨滴对地面的打击力,减少了溅蚀量,同时草被下面的枯枝落叶增加和强化了降水向土壤的入渗,减少径流的形成,削弱了降水的侵蚀能力^[16],植被在防止土壤颗粒流失的同时,相应地减少了土壤全氮的流失^[17]。因此植被盖度的降低,地表拦截径流量的能力减弱,同时土壤中植物根系减少,土粒松散,降雨后土壤蓄水能力很差,土壤支离破碎,极易造成水土流失。

2.3.2 α 多样性的变化

统计表明,样方中出现的物种种类一般在 10 种左右,样地内出现的植物种类约为 13 ~ 24 种,虽然群落间植物丰富度的绝对值存在差异,但并不显著(表 2),这说明多年冻土退化过程中,群落内的绝对物种数目变化不大。群落间均匀度指数差异显著 ($P < 0.05$),表现为先增加后降低,在草原化草甸阶段最大。这说明虽然每种群落的样方内物种总数差异不大,但每个种群的分布和出现的频率不同,说明它们在群落内的作用和重要性不同^[6]。多样性指数在各个群落间也表现为差异显著,其变化趋势和均匀度指数的变化趋势一致。这说明多年冻土的退化,势必引起物种多样性变化^[6],从而对生态系统的稳定性产生影响。

表 1 多年冻土退化过程中不同演替阶段草地群落结构的变化

Table 1 Structure changes in the succession stages of grassland communities due to permafrost degradation				
演替阶段 Successions	建群种 Dominant species	主要伴生种 Associate species	草层高度 Height (cm)	盖度 Coverage (%)
泽化草甸 Swamp meadow	藏嵩草 <i>Kobresia. tibetica</i>	华扁穗草 <i>Blysmus sinocompressus</i> , 圆穗蓼 <i>Polygonum macrophyllum</i> , 斑唇马先蒿 <i>Pedicularis longiflora</i> var. <i>tubiformis</i> , 花葶驴蹄草 <i>Caltha scaposa</i> , 黑褐苔草 <i>Carex atrofusca</i> , 沿沟草 <i>Hippuris vulgaris</i> , 华扁穗草 <i>Blysmus sinocompressus</i>	15 ~ 20	90 ~ 95
典型草甸 True meadow	矮嵩草 <i>K. humilis</i>	线叶蒿草 <i>K. capillifolia</i> , 黑褐苔草, 草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i> , 针茅 <i>Stipa</i> sp., 矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i> , 甘肃棘豆 <i>Oxytrapis kansuensis</i> , 马先蒿 <i>Pedicularis</i> sp., 多裂萎陵菜 <i>Potentilla multifida</i> , 龙胆 <i>Gentiana</i> sp., 垫状点地梅 <i>Androsace tapete</i> , 高山葶苈 <i>Draba alpine</i> ,	5 ~ 25	65 ~ 85
草原化草甸 Steppe meadow	小蒿草 <i>K. pygmaea</i>	异针茅 <i>Stipa aliena</i> , 美丽风毛菊 <i>Saussurea superba</i> , 紫羊茅 <i>Festuca rubra</i> , 垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i> , 柔软紫菀 <i>Aster flaccidus</i> , 龙胆, 异叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia diversifolia</i> , 珠芽蓼 <i>Polygomun viviparum</i> , 甘青兔耳草 <i>Saxifraga tangutica</i>	3 ~ 5	45 ~ 55
沙化草地 Sandy grassland	紫花针茅 + 苔草 <i>Stipapurpurea</i> + <i>Carex</i> sp.	羽柱针茅 <i>Stipa subsessiliflora</i> , 羊茅 <i>Festuca</i> spp., 草地早熟禾, 黄芪 <i>Astragalus</i> spp., 二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> , 风毛菊 <i>Saus-surea</i> sp., 匍匐水柏枝 <i>Myricariap rostrata</i>	8 ~ 12	25 ~ 45

表 2 多年冻土退化过程中不同演替阶段草地群落的植物物种丰富度、均匀度和多样性指数

Table 2 Richness index, evenness index, and diversity index in the succession stages of grassland communities due to permafrost degradation

演替阶段 Successions	样方数 Plots	S	J	H
沼泽化草甸 Swamp meadow	28	10 ± 2. 14	0. 4819 ± 0. 0031b	1. 4895 ± 0. 0032b
典型草甸 True meadow	64	11 ± 2. 67	0. 5013 ± 0. 0014a	1. 4760 ± 0. 0054b
草原化草甸 Steppe meadow	88	12 ± 2. 98	0. 5283 ± 0. 0011a	1. 5541 ± 0. 0274a
沙化草地 Sandy grassland	68	9 ± 3. 21	0. 4533 ± 0. 0117b	1. 1963 ± 0. 0589c

不同字母表示差异显著 The means of different letters are significantly difference

2.3.3 β 多样性的变化

β 多样性指数用以测度群落间的多样性,反映不同群落间物种组成差异。不同群落之间共有种越少,β 多样性越高^[18]。统计结果表明,Whittacker 指数在 4 种取样面积梯度上均随植被的原生演替模式先增加后减少(表 3),这反映了在冻土持续退化过程中土壤环境的分异过程。在沼泽化草甸阶段,土壤含水量高,物种更替速率较小,多生长湿生植物,而冻土退化使土壤含水量减少,这时中生植物入侵和湿生植物并存,样方内物种更替速率增加,β 多样性增大,随着土壤含水量进一步减少,湿生植物消失,草甸植物占据主导地位,同时旱生植物入侵,使样方内物种更替速率进一步增加。冻土持续退化,土壤干燥,异质性减弱,群落以草原植物为主,物种更替速率降低。Whittacker 指数的变化过程反映了多年生冻土退化过程中生境变化的过程,小生境

的异质性程度先增加后减小 ,也反映了冻土退化过程中草地群落物种多样性的变化速率^[7]。

2.4 草地生产力的变化

多年冻土退化的过程中 ,草地初级生产力逐渐减少 ,从沼泽化草甸到典型草甸和草原化草甸 ,植物生物量减少了 60% ,至沙化草地阶段 ,生物量最小 ,仅为 500 kg/hm²左右 (图 4)。但典型草甸和草原化草甸间生物量差异不显著。随着草地类型的更替 ,草地次级生产力 (载畜能力)也发生明显的变化 ,表现为草地次级生产力逐渐降低的变化趋势。以草地的理论载畜量计算 ,沼泽化草甸的理论载畜量是典型草甸和草原化草甸的 3 倍 ,是沙化草地的 10 倍 (图 5) ,而典型草甸和草原化草甸的初级生产力差异并不显著。这说明了在放牧家畜数量不变得条件下 ,草地总载畜能力显著下降 ,从而造成普遍的过牧 ,进一步加剧了草地的退化过程。因此多年冻土退化对高原畜牧业的稳定生产具有的重要影响。保持和维持多年冻土的发育 ,是维持和发展高原畜牧业的一个重要策略。

表 3 多年冻土退化过程中不同演替阶段草地群落 Whittacker 's 指数的变化

取样面积 (m ²) Sampling area	演替阶段 Successions			
	沼泽化草甸	典型草甸	草原化草甸	沙化草地
	Swamp meadow	True meadow	Steppe meadow	Sandy grassland
1	3.20	3.82	4.02	3.22
4	2.82	3.23	3.45	2.80
8	2.23	2.63	2.81	2.47
16	2.23	2.47	2.52	2.33

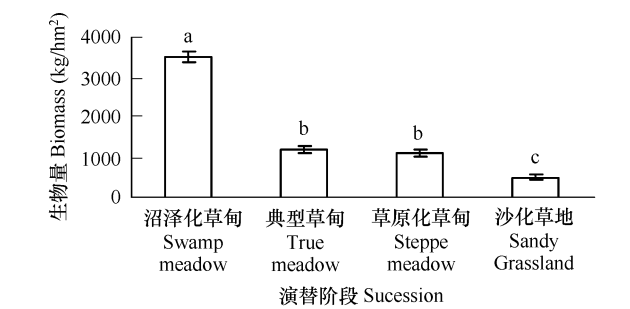


图 4 多年冻土退化过程中不同演替阶段草地群落植物生物量的变化

Fig.4 Biomass changes in the succession stages of grassland due to permafrost degradation

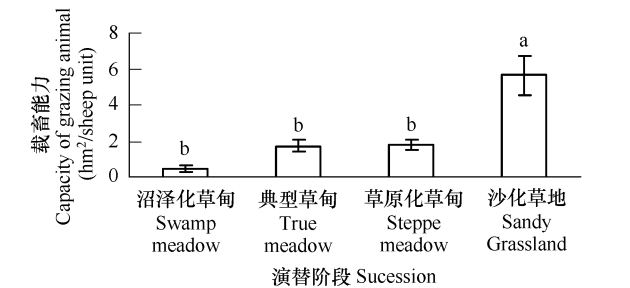


图 5 多年冻土退化过程中不同演替阶段草地群落的理论载畜量的变化

Fig. 5 Theoretical carrying capacity 's changes in the succession stages of grassland due to permafrost degradation

2.6 植物经济类群的变化

在多年冻土退化过程中 ,由于土壤水分分布格局的改变 ,植物经济类群也随之发生显著变化。在由沼泽化草甸演化到典型草甸的过程中 ,禾本科和豆科植物显著增加 ,而莎草科植物减少 ,其他杂草成分显著增加 (表 4)。从典型草甸到草原化草甸 ,建群种由矮蒿草演替为小蒿草 ,中生植物居多 ,莎草科植物变化不明显 ,禾本科植物略有增加 ,而豆科植物棘豆和黄芪则发生了从无到有的变化。草原化草甸到沙化草地。一些植物种开始被淘汰而退出该生境 ,植物种数减少 ,虽然此时建群种为紫花针茅 ,但莎草科植物很少 ,有毒和有害杂草显著增加 ,可食牧草比例减少 ,劣质牧草比例升高。这种不同植物在群落中的地位和作用随着退化时间延续而不断变化 ,群落优势种逐步发生更替 ,最终草地由藏嵩草为优势种的沼泽化草甸演变为以紫花针茅为优势种的沙化草地。原来适应低温高湿的优良牧草禾本科和莎草科植物在现存群落中的数量减少 ,而杂草类植物 ,如雪白萎陵菜 (*Potentilla nivia*) ,棘豆 (*Oxtrapis* sp.) ,毛茛 (*Ranuculus* sp.)等种属的数量在增多^[2] ,草地

质量显著下降。多年冻土退化过程中草地植物经济类群的变化 ,导致草地饲用价值降低 ,从而使草地在相同利用强度和方式下 ,承受放牧干扰的能力下降。

3 结论

多年冻土的发育是青藏高原生态系统稳定的基础。因此多年冻土地退化效应会引发一系列的生态问题和工程问题。随着多年冻土的持续退化 ,土壤温度逐渐升高 ,土壤含水量逐渐下降 ,有机质含量降低。多年冻土环境的变化使地上植被类型发生明显的更替 ,依次出现沼泽化草甸 ,典型草甸 ,草原化草甸 ,最终沦为沙化草地 ,期间物种从湿生和水生向中旱生和旱生植物变化 ,草层高度变矮 ,植被盖度下降 ,物种多样性和群落多样性先增加后降低 ,净初级生产力和载畜能力逐渐下降。因此多年冻土的退化 ,不仅不利于高原冻土生态系统功能的发挥 ,而且不利于草地畜牧业的发展。

表 4 多年冻土退化过程中草地群落的经济类群组成

Table 4 The economy composing of grassland communities in the process of the permafrost degradation

演替阶段 SuccessionsGrassland communities	禾本科 Gramincae (种)	莎草科 Cyperaceae (种)	豆科 leguminosae (种)	其它 Others	总计 Total
沼泽化草甸 Swamp meadow	1	6	0	9	16
典型草甸 True meadow	4	3	2	10	19
草原化草甸 Steppe meadow	5	3	4	8	20
沙化草地 Desert grassland	3	3	2	7	15

References :

[1] Cheng G D ,Zhao L. The problems associated with permafrost in the development of the Qinghai-Xizang Plateau. Quaternary Science ,2000 ,20 (6) 521 — 531.

[2] Yang J P ,Ding Y J ,Chen R S , *et al.* Permafrost Change and Its Effect on Eco-environment in the Source Regions of the Yangtze and Yellow Rivers. Journal of Mountain Science ,2004 ,22 (3) 278 — 285.

[3] Zhang S Q ,WANG Y G ,Zhao Y Z , *et al.* Permafrost degradation and its environmental sequent in the source regions of the Yellow River. Journal of Glaciology and Geocryology ,2004 26 (1) 1 — 6.

[4] Wu Q B ,Zhu Y L ,Shi B. Study of Frozen Soil Environment Relating to Engineering Activities. Journal of Glaciology and Geocryology 2001 23 (2) 201 — 208.

[5] Li S X ,Cheng G D. The analysis and approximate calculation of permafrost evolution. Journal of Glaciology and Geocryology ,1996 ,18 (supp.) : 197 — 205.

[6] Guo Z G ,Wang G X ,Shen Y Y , *et al.* Plant species diversity of grassland plant communities in permafrost regions of the northern Qinghai-Tibet plateau. Acta Ecologica Sinica 2004 24 (1) 149 — 155.

[7] Guo Z G ,Liu H X ,Wang G X , *et al.* Effect of the Qinghai-Tibet Highway on the β diversity of grassland plant communities in the northern region of the Qinghai-Tibet plateau. Acta Ecologica Sinica ,2004 24 (2) :384 — 388.

[8] Tilman D ,Downing J A. Biodiversity and stability in grassland. Nature ,1994 367 363 — 365.

[9] Tracy C R ,Brussard P F. Preserving biodiversity : species in landscape. Ecological Applications ,1994 4 205 — 207.

[10] Naeem S ,Li S. Biodiversity enhance ecosystem reliability. Nature ,1997 390 507 — 509.

[11] Wang G X ,Cheng G D ,Shen Y P , *et al.* Research on ecological environmental change in Changjiang-Yellow rivers sources regions and their integrated protection. Lanzhou :Lanzhou University Press ,2001. 29 — 35.

[12] Sun H S. The alpine steppe resources and its sustainable utilization in Qinghai. Pratacultural Science ,1998 ,15 (3) 1 — 3

[13] Huang F X ,Gao Q ,Zhao S Y. The concept of carrying capacity on ecological angle of view. Acta Prataculturae Sinica 2000 9 (3) 48 — 57

[14] Ren J Z. Research Methods of Pratacultural Science. Beijing :China Agriculture Press ,1998.

[15] Zhou X M. Kobresia meadow in China. Beijing :Science Press 2001. 7 — 11.

[16] Zhu L Q ,Xu S M ,Chen P Y. Study on the impact of land use / land cover change on soil erosion in mountainous areas. Geographical Research , 2003 22 (4) 432 — 38

[17] Zhang X C ,Liu G B ,Fu H F. Soil nitrogen losses of catchments by water erosion as affected by vegetation coverage. Environmental Science ,

2000 , 21 (6) : 16 — 19.

[18] Bai Y F ,Xing X R ,Xu Z X *et al.* β diversity of *Stipa* communities in Inner Mongolia Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2000 ,11 (3) : 408 — 412.

[19] Wang G X ,Shen Y P ,Qian J ,*et al.* Study on the Influence of Vegetation Change on Soil Moisture Cycle in Alpine Meadow. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2003 25 (6) : 653 — 659.

[20] Wang S L ,Zhao X F. Environmental change in patchy permafrost zone in the south section of the Qinghai-Xizang highway. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 1997 ,19 (3) : 231 — 239.

[21] Wang G X ,Shen Y P ,Cheng G D. Eco-environmental changes and causal analysis in the source regions of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2000 ,22 (3) : 200 — 205.

参考文献：

[1] 程国栋,赵林. 青藏高原开发中的冻土问题. 第四纪研究, 2000 20 (6) 521 ~ 531.

[2] 杨建平,丁永建,陈仁升,等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应. 山地学报 2004 , 22 (3) 278 ~ 285

[3] 张森琦,王永贵,赵永真,等. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映. 冰川冻土 2004 26 (1) : 1 ~ 6

[4] 吴青柏,朱元林,施斌. 工程活动下的冻土环境研究. 冰川冻土 2001 23 (2) 201 ~ 208.

[5] 李述训,程国栋. 多年冻土的形成演化过程分析及近似计算. 冰川冻土, 1996 ,18 (专辑) : 197 ~ 205

[6] 郭正刚,王根绪,沈禹颖,等. 青藏高原北部多年冻土区草地植物多样性. 生态学报 2004 24 (1) : 149 ~ 155.

[7] 郭正刚,刘慧霞,王根绪,等. 人类工程对青藏高原北部草地群落 β 多样性的影响. 生态学报 2004 24 (2) : 384 ~ 388.

[11] 王根绪,程国栋,沈永平,等. 江河源区的生态环境变化及其综合保护研究. 兰州 : 兰州大学出版社 2001. 29 ~ 35

[12] 孙海松. 青海高寒草地资源的可持续利用. 草业科学, 1998 ,15 (3) : 1 ~ 3

[13] 黄富祥,高琼,赵世勇. 生态学视角下的草地载畜量概念. 草业学报 2000 9 (3) : 48 ~ 57

[14] 任继周. 草业科学研究方法. 北京 : 中国农业出版社.

[15] 周兴民. 中国嵩草草甸. 北京 : 科学出版社. 2001. 7 ~ 11.

[16] 朱连奇,许叔明,陈沛云山区土地利用/ 覆被变化对土壤侵蚀的影响. 地理研究 2003 , 22 (4) : 432 ~ 438

[17] 张兴昌,刘国彬,付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响. 环境科学 2000 21 (6) : 16 ~ 19

[18] 白永飞,邢雪荣,许志信,等. 内蒙古高原针茅草原群落 β 多样性研究. 应用生态学报 2000 ,11 (3) : 408 ~ 412.

[19] 王根绪,沈永平,钱鞠,等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究. 冰川冻土 2003 25 (6) : 653 ~ 659.

[20] 王绍令,赵秀锋. 青藏公路南段岛状冻土区内冻土环境变化. 冰川冻土, 1997 , 19 (3) : 231 ~ 239.

[21] 王根绪,沈永平,程国栋. 黄河源区生态环境变化与成因分析. 冰川冻土, 2000 , 22 (3) : 200 ~ 205.