

植被根系及其土壤理化特征在高寒小嵩草草甸退化演替过程中的变化

王长庭^{1*}, 王根绪², 刘伟³, 王启兰³, 向泽宇¹

1. 西南民族大学生命科学与技术学院, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;
3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001

摘要: 以野外样地调查和室内分析法研究了不同退化演替阶段高寒小嵩草草甸的植被根系空间变化和土壤环境因子间的关系。结果表明, 不同退化演替阶段高寒小嵩草草甸群落植被根系和蕴育植被根系的土壤量发生了明显的变化。特别是 0~10 cm 土层的植被根系在重度退化阶段显著高于其它退化演替阶段 ($P < 0.05$), 而蕴育植被根系的“载体”量在重度退化阶段显著低于其它退化演替阶段 ($P < 0.05$), 根土比 (根和土的重量比) 明显高于其它退化演替阶段 ($P < 0.05$); 随着退化演替阶段的进行, 高寒小嵩草草甸群落物种数、地上部分、植被根系锐减, 群落结构和功能明显发生变化; 不同退化演替阶段, 植被根系 (0~40 cm) 的垂直分布、根土比与土壤容重、土壤含水量以及土壤中 N、P 含量存在一定的相关性; 不同退化演替阶段高寒小嵩草草甸土壤理化特性的变化影响草地群落地上部分和植被根系; 土壤的稳定性是草地生产稳定和恢复的重要因素, 在评价与改良退化草地时, 要充分了解土壤的退化程度。在高寒草甸地下根系取样方法难以统一, 而且土壤表层根系和土壤很难以分离, 加之根系采样破坏性大、工作量大, 根土比可能是指示高寒草甸退化程度相对可靠的量化指标。

关键词: 退化演替; 植被根系; 土壤环境; 高寒草甸; 根土比

中图分类号: Q948

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 03-0409-08

根系是土壤和植物的动态界面。植物根系是固定和支撑植物体的重要器官, 是土壤资源的直接利用者和产量的重要贡献者^[1]。根系作为生态系统中一个重要组成部分, 拥有丰富的、可以维持生态系统功能的生态多样性, 它不仅为植被提供有效的水分及养分, 更重要的在于它是陆地生态系统中碳分配与碳循环过程的核心环节之一^[2]。当今的生态学家已经越来越强烈地认识到, 鲜为人知的地下部分已成为生态系统结构、功能与过程研究中最不确定的因素, 因而严重制约着生态系统与全球变化研究的理论拓展。自1990年代后期以来, 伴随着全球生态学研究的深入, 一个新兴的生态学领域——地下生态学开始形成, 并得到了快速发展^[3]。

土壤状况, 尤其是肥力状况影响着群落优势种的拓殖和更替, 土壤肥力提高有利于演替后续种的生长和发展, 促进群落演替过程。因此, 植物演替过程, 也是物种对土壤肥力不断适应和改造及不同物种在不同肥力梯度下的相互竞争和代替的过程, 土壤肥力是植物演替的重要驱动力之一^[4]。自然植被被干扰 (放牧)

后, 在植被演替和恢复过程中, 植物群落组成、结构、土壤的理化性质和养分含量都会发生变化, 为适应植被特征和环境因子变化, 根系及其分布特征会相应的改变, 进而反馈于植被演替, 影响进程。过度放牧使土壤养分输出增加^[5], 使地表裸露, 易于发生土壤水土侵蚀。放牧不仅影响到草地植物的演替, 同时影响到土壤的生境^[6]。放牧是导致高寒草甸植被发生退化演替的主要驱动力之一^[7]。植物根系的地下分配格局会对整个生态系统产生重要的影响^[8]。根系也是植物群落演替的重要内容, 在植被演替过程中占有十分重要的地位, 对不同演替阶段植被根系进行研究, 可揭示植物群落演替的一般规律以及不同演替阶段生态系统的功能^[9-12]。然而在草地生态系统研究领域, 对直接产生经济效益的植物地上部分研究深入细致, 而且已经形成了较为完善的理论体系。相比之下, 对产生巨大生态效益的草地植物地下部分的研究尚处于初级探索阶段^[13]。事实上, 植物在生长过程中, 地下根系的吸收与储藏功能决定着地上部分生长状况, 进而影响到地上部分对各种不良条件的抵抗能力、生产量和质量等; 地

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题 (XDA05050207); 西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金 (11NZYTH07); 国家自然科学基金项目 (40925002)

作者简介: 王长庭, 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事草地生态、恢复生态学和根系生态学方面的研究。E-mail: wangct@swun.edu.cn; wangct6@163.com

*通信作者: E-mail: wangct@swun.edu.cn; wangct6@163.com

收稿日期: 2011-11-02

下根系内部所进行的复杂的生物化学作用, 提供了植物地上部分正常生长所必须的能量和物质, 这是其它植物器官所不可替代的。

生态系统地上与地下过程的关联主要是通过根系实现的, 根系是植被地下部分的重要组成。随着全球变化与地下生态学研究的深入, 对根系生态的研究也日益受到重视^[3, 14]。根系是植物从土壤中获取养分和水分并输送给植物体的重要器官, 由于土壤的不透明属性阻碍了根系的观测, 缺乏有效的原位根系观测方法已经构成了对植物根系深入研究的技术瓶颈^[15]。尤其是青藏高原高寒草甸, 根系的研究不仅在技术上是困难的, 到目前还没有一个被普遍接受的方法, 而且在理论上也是缺乏的。因此, 土壤环境因子、根系微环境对根系生态系统的影响及其响应; 根系的时空分布格局; 全球变化对根系生态学的影响等的研究, 将是以后生态系统生态学研究的重点, 越来越引起国内外研究者的关注。本文对不同退化演替阶段高寒小嵩草草甸群落物种组成、根系的分布和根土比的变化特征及其与土壤环境之间的关系进行研究, 旨在揭示不同自然环境条件下生态系统稳定或退化机理, 从而为当地的植被恢复和可持续生态系统的建设提供科学依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究地区概况

本研究于2007—2008年8月在三江源腹地青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡进行。地理位置为37°22.910'~34°20.064'N, 100°30.741'~100°29.668'E, 平均海拔4150 m, 范围3800~4800 m。该地区气候具有典型的高原大陆性气候特点, 无四季之分, 仅有冷暖季之别, 冷季漫长、干燥而寒冷, 暖季短暂、湿润而凉爽。温度年差较小而日差较悬殊, 太阳辐射强烈。日照充足, 年日照平均值在2500 h以上, 年总辐射量在629.9~623.8 kJ·cm⁻²。冷季持续时间长达7~8个月; 暖季湿润, 长4~5个月。年平均气温-1.7℃, 1月平均气温-14.8℃, 7月平均气温9.8℃。年平均降水量600 mm, 主要降水量集中在5—9月, 约占年降水量的80%, 蒸发量1160.3 mm。土壤为高山草甸土和高山灌丛

草甸土。高山嵩草草原化草甸为该地区主要的草地类型。建群种为小嵩草(*Kobresia pygmaea*), 主要的伴生种有羊茅(*Festuca ovina*)、异针茅等禾草, 杂类草有高山紫菀(*Aster alpina*)、湿生扁蕾(*Gentianopsis paludosa*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)、异叶米口袋(*Gueldenstaedtia diversifolia*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)等主要植物。

1.2 试验设计

根据研究区域草地退化程度, 采用草地退化五级梯度标准^[16], 利用空间分布代替时间演替的方法^[17]来研究植物群落演替动态和土壤特征的变化。草原群落随着放牧强度的退化等级, 最明显地表现在居民点或家畜饮水点周围相继分布的环带状变化上, 即由此向外放射, 沿半径方向构成草原群落的牧压梯度和相应的放牧退化等级^[18]。因此, 以离牧民定居点远近划分并选择不同退化程度的高寒嵩草草甸样地共5处, 每处3个平行样地: 未退化原生草甸、轻度退化草甸、中度退化草甸、重度退化草甸和极度退化(“黑土滩”)草甸为试验样地(表1), 样地面积均为50 m×50 m, 土壤为高山灌丛草甸土。地上生物量在用收获法测定, 面积为50 m×50 m的样地上选择有代表性地段, 用对角线法设置10个50 cm×50 cm的观测样方。在植物生物量高峰期(8月底)测定植物群落的种类组成及其特征值(盖度、高度、频度)。

地下生物量用土钻取样^[19], 0~40 cm土层每10 cm取样, 共4层, 用内径5 cm土钻在每个观测样方取10钻, 样品过筛得到土壤样品并称重, 清水冲洗得到根系样品, 分别在60和105℃烘至恒质量, 称干质量。

于2005、2006年8月在测定过地下生物量的样方, 采用100 cm³环刀以土壤剖面法分层(0~10 cm、10~20、20~30和30~40 cm)测定土壤容重。用土钻钻取10个样点(样点呈“V”字形排列, 样点间距2 m)0~40 cm土壤, 10个样点的土样混合成1个500 g的土壤样品, 风干后测定土壤基本成分。土壤中的测试项目为土壤样品的全磷

表1 研究地点地理位置和土壤特征

Table 1 Geographical and edaphic characteristics of study sites in the *Kobresia pygmaea* meadow

项目	原生植被	轻度退化	中度退化	重度退化	极度退化(黑土滩)
方位	34°30.405' N 100°05.897' E	34°29.957' N 100°07.432' E	34°25.229' N 100°21.055' N	34°21.937' N 100°29.697' E	33°34.354' N 99°54.199' E
海拔	4000	3910	3892	3972	4073
坡度	5°, SW	15°, SW	15°, SW	10°, SW	5°, SW
土壤类型	AMS	AMS	AMS	AMS	AMS

SW: southwest aspect; AMS: alpine meadow soil

(钼锑抗比色法)、速效磷(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)、全N和速效N(凯氏法和康维皿法)、及有机质含量(丘林法)[20]。

1.3 计算方法

植物多样性的测定:

多样性指数、均匀度指数的计算[21]

丰富度指数 $R=S$

群落多样性指数的计算采用 Shannon—Wiener 指数:

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

均匀度指数的计算采用 Pielou 指数:

$$J = (-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i) / \ln S$$

式中: P_i 为种 i 的相对重要值(相对高度+相对盖度+相对频度)/3, S 为种 i 所在样方的物种总数。

1.4 数据分析

在数据分析和处理中,主要采用 SPSS 10.0 统计软件和 DPS 7.05 统计软件。运用回归方法、通径分析方法分析不同放牧梯度下高寒草甸植被根系、根土比的变化与土壤肥力间的关系;用邓肯氏新复极差检验法(DMRT)评价不同退化演替阶段高寒草甸植被根系、群落地上部分、土壤理化特征的差异性。

2 结果与分析

2.1 退化演替过程中植被根系、土壤量和根土比的垂直分布变化

植被根系、土壤量和根土比的垂直分布见图 1a)-c)。虽然在不同退化演替阶段,大量的根系集中在 0~10 cm 土层,但随着演替的进行,植被根系分布的比例在重度退化阶段最高,随之又逐渐降低。

不同退化演替阶段(原生植被、轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化),植被根系均主要分布在 0~10 cm,分别占总根系量的 75.54%、74.56%、66.67%、83.01%和 45%;在土层 10~20 cm,分别占总根系量的 15.11%、18.42%、15.94%、12.14%和 23.33%。特别是在重度退化演替阶段,0~10 cm 土层的根系量最大。

土壤量在不同演替阶段随着土层深度的加深,土壤量逐渐增加。但随退化演替的进行,0~10 cm 土层的土壤量逐渐降低,分别占总土壤量 23.71%、23.17%、20.45%、11.66%和 17.71%,在重度退化演替阶段为最低(11.66%);在土层

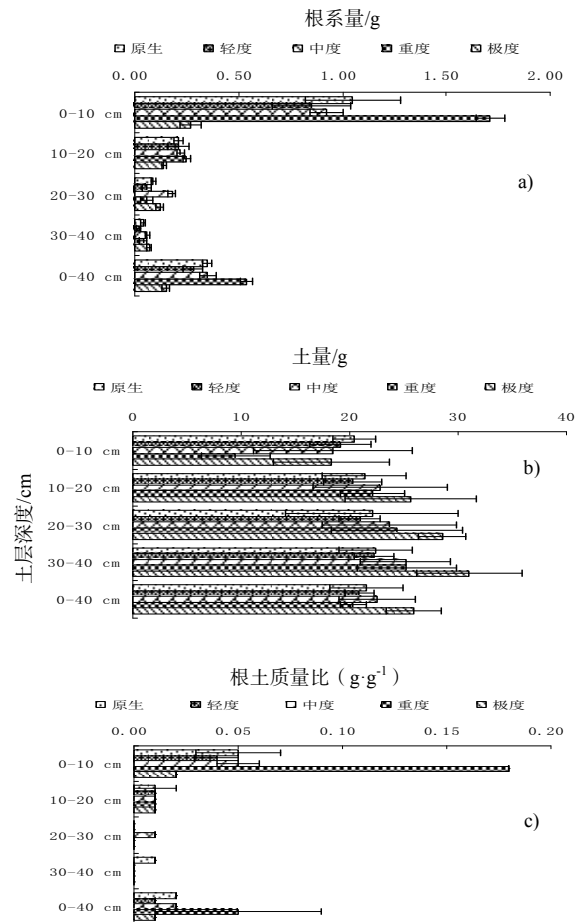


图1 高寒小嵩草草甸群落土壤根系、土壤量及其根土比的变化
Fig.1 Change of roots (A), soils (B), and its ratio (C) in the *Kobresia pygmaea* meadow community

10~20 cm,分别占总土壤量的 24.56%、24.75%、25.35%、27.28%和 24.73%。

在 0~10 cm 土层中,根土比与植被根系的变化相一致。特别是在重度退化演替阶段,0~10 cm 土层的根土比最大(0.18),极度退化演替阶段的根土比例最小(0.02)。

2.2 不同退化演替阶段小嵩草草甸土壤理化特征

随着高寒草甸的退化程度加大,土壤容重逐渐增加(表 2)。土壤含水量与降水和地面蒸发密切相关。不同退化演替阶段由于植被覆盖度的差异,太阳对土壤的辐射不同,土壤水分蒸发也就不同,导致土壤湿度分异(表 2)。说明人类活动干扰引起高寒小嵩草草甸植物群落草丛中结构、组成发生改变,草地植物群落发生退化演替(逆向演替),随着植被的退化演替,土壤也逐步贫瘠化。

2.3 不同退化演替阶段物种组成、生物量变化

从高寒小嵩草草甸不同退化演替阶段植物群落多样性、生产力分析结果可知,处于不同演替阶段的 5 种群落类型由于受人为干扰和外界影响

表 2 高寒小嵩草草甸群落的土壤特征

Table 2 The soil properties (0-40 cm) of the *Kobresia pygmaea* meadow community

项目	原生植被	轻度退化	中度退化	重度退化	极度退化 (黑土滩)
ρ (容重)/(g·cm ⁻³)	0.997±0.026 ^c	1.233±0.144 ^b	1.356±0.039 ^{ab}	1.435±0.026 ^a	1.489±0.103 ^a
湿度/%	32.95±2.39 ^a	23.93±2.16 ^b	20.06±0.92 ^c	14.89±1.35 ^d	11.52±0.90 ^e
w(全氮)%	0.43±0.02 ^a	0.27±0.01 ^b	0.22±0.07 ^{bc}	0.18±0.01 ^c	0.12±0.01 ^d
w(速效氮)/(mg·kg ⁻¹)	23.24±1.83 ^a	24.55±2.72 ^a	22.59±1.17 ^a	16.90±2.49 ^b	9.66±1.83 ^c
w(全磷)%	0.08±0.01 ^a	0.06±0.00 ^b	0.05±0.00 ^b	0.06±0.00 ^b	0.06±0.00 ^b
w(速效磷)/(mg·kg ⁻¹)	5.70±1.30 ^b	6.06±0.11 ^a	4.15±0.67 ^c	4.67±0.71 ^c	5.88±0.91 ^b

不同退化梯度数据, 相同字母表示数据间差异不显著 (DMRT 法 $P=0.01$)

程度各异, 其群落多样性和生物量有明显的差别 (表 3)。群落地上部分、植被根系、物种丰富度指数、物种多样性指数 (H') 和均匀度指数 (J) 随退化程度的加剧而逐渐降低, 但在轻度、中度退化演替阶段多样性、生产力出现一些波动, 即相对于其它退化演替阶段多样性、生产力较高。

2.4 植被根系 (0~40 cm) 与土壤环境因子的关系

不同退化演替阶段高寒小嵩草草甸植被根系与土壤理化特征的数量变动范围不同, 从逐步回归中不能直观地看出哪个因子对植被根系的影响最明显, 而通过标准化回归系数的方法计算通径系数, 通过比较各因子直接与间接通径系数值, 能明显地看出各个因子对植被根系的作用。根 (0~40 cm) (Y)、土壤容重 (X_1)、土壤含水量 (X_2)、土壤有机质 (X_3)、全氮 (X_4)、速效氮 (X_5)、全磷 (X_6)、速效磷 (X_7)。

由表 4 可见, 原生植被中, 影响植被根系 (0~40 cm) (Y) 的主要因素为 X_1 、 X_5 和 X_7 。 X_1 、 X_5 和 X_7 对 Y 的直接正、负效应均大于间接效应。说明 X_1 、 X_5 和 X_7 对 Y 的主要贡献表现为直接正、负效应。

轻度退化中, 决定 Y 大小的关键因素是 X_1 、 X_3 和 X_5 。 X_1 、 X_3 和 X_5 对 Y 的直接正、负效应均大于间接负效应, 说明在轻度退化过程中, X_1 、 X_3 、 X_5 是调控 Y 的关键因素, 其中 X_3 和 X_1 对 Y 的影响相对较大, X_5 的正效应相对较小。

中度退化中, 影响 Y 的主要因素为 X_1 、 X_3 和 X_7 。 X_1 和 X_7 对 Y 的直接正、负效应大于间接效应, 而 X_3 对 Y 的直接效应小于间接效应。说明 X_7 对 Y

的影响最大, 其次是 X_1 , 而 X_3 不仅直接影响 Y , 还通过 X_7 的负作用来调节 Y 的大小。

重度退化中, 影响 Y 的主要因素为 X_1 、 X_2 和 X_5 。其中 X_2 和 X_5 直接正效应大于间接效应, X_1 的直接负效应小于间接效应。表明 X_2 对 Y 的影响最大, X_1 对 Y 的作用是通过 X_2 得以实现。

极度退化中, 决定 Y 大小的关键因素是 X_1 、 X_6 和 X_7 。 X_1 对 Y 的直接负效应大于间接负效应, 而 X_6 和 X_7 直接正、负效应均小于间接负效应, 并且 X_6 的间接负效应相对较小。说明在极度退化过程中, X_1 是调控 Y 的关键因素, X_7 主要通过 X_1 的负效应来影响 Y 的大小。

3 讨论

3.1 不同退化演替过程中植被根系、土壤量和根土比的变化特征

由于植物根系与土壤之间具有极大的接触面, 在土壤和植物之间进行频繁的物质交换, 彼此强烈影响, 因而土壤是植物的一个重要生态因子, 通过控制土壤因素就可以影响植物的生长和产量。不同退化演替阶段, 高寒小嵩草草甸群落植被根系和蕴育植被根系的土壤量发生了明显的变化 (图 1)。特别是 0~10 cm 土层的根系在重度退化阶段显著高于其它退化演替阶段 ($P<0.05$), 而蕴育土壤根系的“载体”量在重度退化阶段显著低于其它退化演替阶段 ($P<0.05$), 根土比 (根和土的体积比) 明显高于其它退化演替阶段 ($P<0.05$); 重度退化阶段 0~40 cm 土层的根系和根土比明显高于其它退化演替阶段 ($P<0.05$)。而在极度退化 (“黑土滩”) 演替阶段根系急剧下降,

表 3 高寒小嵩草草甸群落物种数、地上生物量、地下生物量和物种多样性指数

Table 3 Number of species, above-ground biomass, below-ground biomass and species diversity indices in the *Kobresia pygmaea* meadow community

群落	物种数	地上部/(g·m ⁻²)	植被根系/(g·m ⁻²)	Shannon—Wiener 指数	Pielou 指数
原生植被	28	223.66±8.36 ^b	2076.83±187.72 ^b	3.32	0.89
轻度退化	30	233.10±5.14 ^a	2643.68±317.03 ^a	3.41	0.93
中度退化	31	224.09±3.29 ^b	1672.03±229.29 ^b	3.42	0.92
重度退化	16	181.63±8.68 ^c	678.85±69.80 ^c	2.65	0.82
极度退化 (黑土滩)	13	67.36±15.61 ^d	495.33±25.52 ^c	2.46	0.84

不同退化梯度数据, 相同字母表示数据间差异不显著 (DMRT 法 $P=0.01$)

表 4 不同放牧梯度下高寒草甸植被根系(0~40 cm)与土壤理化特征间的通径分析
Table 4 Path analysis vegetation roots (0-40 cm) to soil physical and chemical characteristics in alpine meadow

放牧梯度	因子	决定系数	直接通径系数	间接通径系数	剩余通径系数
原生植被				Sum	
	X_1		-0.6039	X_1	X_7
	X_5	0.9893	-0.3557	X_5	X_7
	X_7		0.7363	X_1	X_7
轻度退化				Sum	
	X_1		-0.7217	X_1	X_5
	X_3	0.9336	0.7571	X_3	X_5
	X_5		0.2277	X_1	X_5
中度退化				Sum	
	X_1		-0.5044	X_1	X_7
	X_3	0.9883	0.23	X_3	X_7
	X_7		0.8066	X_1	X_7
重度退化				Sum	
	X_1		-0.3994	X_1	X_5
	X_2	0.9853	0.9496	X_2	X_5
	X_5		0.3882	X_2	X_5
极度退化(黑土滩)				Sum	
	X_1		-0.5869	X_1	X_7
	X_6	0.9998	0.0455	X_6	X_7
	X_7		-0.4593	X_6	X_7

Y: 根(Roots) 0~40 cm; X_1 : 土壤容重(Soil bulk density); X_2 : 土壤含水量(Soil moisture); X_3 : 土壤有机质(Soil organic matter); X_4 : 全氮(Total nitrogen); X_5 : 速效氮(Available nitrogen); X_6 : 全磷(Total phosphorous); X_7 : 速效磷(Available phosphor)

主要是过度放牧、风蚀、冻融等作用使得高寒小嵩草草甸草毡表层剥蚀，高寒草甸群落优势种嵩草属植物和次优势种禾本科植物被一些放牧家畜不喜食的毒杂草所替代，因此极度退化（“黑土滩”）演替阶段 0~10、0~40 cm 土层根系量急剧减少。不同退化演替阶段群落土壤根系随土层的加深而降低，而蕴育土壤根系的“载体”量则随土层的加深而增加。

3.2 土壤理化特征对群落物种组成和植被根系的影响

根系是构成个体及生态系统的重要部分，根系的空间分布特征决定了植被与土壤环境之间作用面的大小，它的分布特征及其与土壤环境之间的复杂关系对植被地上部分的生长有着重要的影响。植物依赖根系来吸收土壤中的矿质营养和水分，并输送到地上部分供它利用。根系的分布受土层厚度、土壤容重、土壤温度、土壤空隙度、土壤动物和微生物、腐殖质颗粒大小等的影响^[22-23]。根系在土壤中纵横穿行，有利于形成团粒结构，改善土壤的物理性质。例如，土壤容重影响根系穿透能力，温度对根系呼吸和根系的伸长生长有强烈影响，养分条件控制细根生产和分布^[24]。在草原群落恢复演替过程中，种群的根系分布特征决定了其在衰退—由衰退向恢复演替转变—恢复演替过程中的命运^[25]。在演替过程中，植

被自动调节根系分布，以适应光能、空间及养分资源的地下部竞争，而根系分布的动态反馈给群落或生态系统后，往往影响演替进程。如：放牧干扰不仅改变了高寒小嵩草草甸植被根系和蕴育根系的“载体”量（图1），改变了植物群落的结构和功能（表3），而且使土壤的物理和化学特性发生了明显的改变（表2）。原生植被其结构和功能保存较好，小嵩草草甸处在放牧演替顶极群落状态，植物群落矮小密集，盖度较大，土壤生草层紧密、结实而有弹性，外来物种很难入侵和生存，所以物种丰富度相对较低，植物群落的优势种高山嵩草种群在空间占有明显的生态位优势，使群落物种均匀度指数下降，从而形成物种多样性指数较低的格局。适度的干扰可能使得植物种群对有限资源的竞争趋于平衡，从而使物种得以共存。到重度退化和极度退化阶段，高寒小嵩草草甸群落物种数、地上部分、植被根系锐减，群落结构和功能明显发生变化。

3.3 植被根系与土壤肥力的关系

土壤中 N、P 的含量与植被根系的分布和根土比例密切相关。Millikin and Bledsoe^[26]在所研究地区内发现土壤中 N 主要集中在 5 cm 以内，所以大量的细根集中在土层表面。细根的垂直分布与土壤容重、水分和土壤中的 C、N 的百分含量均有一定的相关性^[27]。在本项研究的小嵩草草甸不

同退化演替阶段, 植被根系(0~40 cm)均受到土壤容重的直接影响。原生植被阶段, 土壤速效氮(X_5)和速效磷含量(X_7)直接影响植被根系(0~40 cm); 轻度退化阶段, 土壤有机质(X_3)和速效氮(X_5)对植被根系(0~40 cm)表现为直接作用; 中度退化阶段, 土壤有机质(X_3)和速效磷(X_7)则是影响植被根系(0~40 cm)的主要因素; 重度退化阶段, 土壤含水量(X_2)和速效氮(X_5)对植被根系(0~40 cm)的影响最为明显; 极度退化阶段, 速效磷(X_7)对植被根系(0~40 cm)的效果是通过土壤容重(X_1)得以发挥。因此, 随着退化演替程度的加深, 土壤容重随之增加, 而土壤含水量降低, 蕴育土壤根系的基质量(土壤量)逐渐减少, 根土比特别是0~10 cm土层的根土比例增加(图1), 土壤基质量的减少导致大部分地下根系由于营养供给水平的降低而死亡, 归还土壤中有机的数量逐渐减少, 加之地上部分持续利用, 土壤养分也在不断消耗, 土壤基质量的减少和土壤资源持续供给能力的下降, 草地发生逆向演替(退化), 表现在: 物种数减少、多样性下降、能量的分配转向地下等。

当然, 根系的分布及数量由于影响到植被拥有地下营养空间的大小和土壤营养及水分的利用, 直接影响到地上部分产量的高低。土壤有机质等不仅与温度、降水量有关, 而且与土壤特性、植被特征和干扰程度有关^[28]。随着退化演替的进行, 土壤养分逐步贫瘠化(表2)。一方面在放牧干扰下, 小嵩草草甸地下根系极度发育, 造成土壤养分的生物固定引起营养供求失调, 草毡表层的加厚使得水分渗透能力降低而发生局部死亡^[29]; 另一方面放牧、鼠害以及风蚀、水蚀的继续作用, 草皮层塌陷, 秃斑面积逐步扩大, 表层季节性冻融交替形成宽窄不一的裂缝。此时的生境更加恶化, 以小嵩草为优势种的原生植被几乎消失殆尽, 形成黑土型次生裸地(黑土滩), 这个阶段(重度、极度退化)植被根系急剧下降。土壤结构破坏、土壤养分减少、土壤蒸发加快, 这样就使得土壤向干旱化、贫瘠化方向发展, 推动了土壤的退化过程。李绍良等认为, 土壤退化比植被的退化缓慢, 土壤具有较强的抗拒退化的能力, 它是土壤性质的综合表现, 可以称之为土壤稳定性。土壤的稳定性是支撑草地生产稳定和恢复的重要因素, 在评价与改良退化草地时, 要充分了解土壤的退化程度, 引起退化的主导因子, 因地制宜的采取措施减缓土壤退化。例如极度退化(黑土滩)的高寒草甸适宜采用松土、耕、耙等农艺措施改良, 建植人工草地, 而中、轻度退

化草地则采用围栏封育、施肥的方法更为合理。

4 结论

(1) 不同退化演替阶段, 放牧干扰不仅改变了高寒小嵩草草甸植被根系分布、根土比例; 而且随着退化演替阶段的进行, 蕴育土壤根系的基质量逐渐减少, 根土比特别是0~10 cm土层的根土比例增加; “载体”量减少导致大部分地下根系由于营养供给水平的降低而死亡, 归还土壤中有机的数量逐渐减少, 土壤的物理和化学特性发生了明显的改变。

(2) 不同退化演替阶段, 植被根系(0~40 cm)的垂直分布、根土比与土壤容重、土壤含水量以及土壤中有机的、速效养分含量存在一定的相关性。

(3) 随着退化演替阶段的进行, 高寒小嵩草草甸群落物种数、地上部分、地下根系锐减, 群落结构和功能明显发生变化。地下根系的极度发育, 土壤与牧草间营养供求失调, 加之家畜、鼠害以及风蚀、水蚀的继续作用, 草皮层滑塌剥离, 形成塌陷, 其生境更加恶化, 以小嵩草为建群种的原生植被几乎消失形成“黑土滩”。

参考文献:

- [1] 周本智, 张守攻, 傅懋毅, 等. 植物根系研究新技术Minirhizotron的起源、发展和应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26: 253-260.
ZHOU Benzhi, ZHANG Shougong, FU Maoyi, et al. Minirhizotron, a new technique for plant root system research: its invention, development and application [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26: 253-260.
- [2] 郝艳茹, 彭少麟. 根系及其主要影响因子在森林演替过程中的变化[J]. 生态环境, 2005, 14(5): 762-767.
HAO Yanru, PENG Shaolin. Variation of roots and its impact factors in succession [J]. Ecology and Environment 2005, 14(5): 762-767.
- [3] 贺金生, 王政权, 方精云. 全球变化下的地下生态学: 问题与展望[J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1226-1233.
HE Jinsheng, WANG Zhengquan, FANG Jingyun. Belowground ecology under global change: problem and prospective [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(13): 1226-1233.
- [4] 张庆费, 宋水昌, 由文辉. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 174-178.
ZHANG Qingfei, SONG Yongchang, YOU Wenhui. Relationship between plant community secondary succession and soil fertility in Tiantong, Zhejiang Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 174-178.
- [5] ISABELLE K, COLIN D R, HUBERT T. Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2006, 113: 378-390.
- [6] 王仁忠, 李建东. 放牧对松嫩平原羊草草地影响的研究[J]. 草业科学, 1992, 9(2): 11-14.
WANG Renzhong, LI Jiandong. The influence of grazing on the *Aneurolepinium* Chinese grassland in Songnen plain [J]. Practaculture

- Science, 1992, 9 (2): 11-14.
- [7] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性, 生产力对养分条件变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4144-4152.
WANG ChangTing, LONG RuiJun, WANG QiLan, et al. Response of plant diversity and productivity to soil resources changing under grazing disturbance on an alpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4144-4152.
- [8] PETERS D P C. Plant species dominance at a grassland-shrubland ecotone: An individual—based gap dynamics model of herbaceous and woody species[J]. Ecological Modelling, 2002, 152: 5-32.
- [9] RENTER A, ENGELS C. Root dynamics at different soil depths in grassland communities differing in plant diversity [J]. Verhandlungen der Ceselischaf fur? Kologie Band, 2002, 32: S. 357.
- [10] 黄国宏. 黄土高原自然植被演替过程中的植物特征与土壤元素动态[J]. 植物学报, 2002, 44: 990-998.
HUANG Guohong. Plant character and soil element dynamic of natural vegetation succession in Loess Plateau [J]. Acta Botanica Sinica, 2002, 44: 990-998.
- [11] 张全发, 郑重, 金义兴. 植物群落演替与土壤发展之间的关系[J]. 武汉植物学研究, 1990, 8(4): 325-334.
ZHANG Quanfa, ZHENG Zhong, JIN Yixing. The relationship between plant community succession and soil development [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1990, 8(4): 325-334.
- [12] 梁建生, 张建华, 曹显祖. 根系环境温度变化对根系吸水 and 叶片蒸腾的影响[J]. 植物学报, 1998, 40(12): 69-75.
LIANG Jiansheng, ZHANG Jianhua, CAO Xianzu. Effect of changes of temperature around roots in relation to water uptake by roots and leaf transpiration[J]. Acta Botanica Sinica, 1998, 40(12): 69-75.
- [13] 王立群, 陈世璜. 草地植物根系类型划分原则的探讨[J]. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24 (3): 11-14.
WANG Liqun, CHEN Shihuang. Study on the principle of dividing root system type of lawn plant[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2003, 24 (3): 11-14.
- [14] 王政权, 郭大立. 根系生态学[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1213-1216.
WANG Zhengquan, GUO Dali. Roots ecology [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1213-1216.
- [15] 李克新, 宋文龙, 朱良宽. 植物根系构型原位观测识别技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2066-2071.
LI Kexin, SONG Wenlong, ZHU Liangkuan. Observation and measurement of plant root architecture in situ: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9): 2066-2071.
- [16] 张镡铨, 郑度, 刘晓东, 等. 青藏高原区域生态环境变化及其管理对策探讨[A]//郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应[C]. 北京: 科学出版社, 2004: 459-554.
ZHANG Yili, ZHENG Du, LIU Xiaodong, et al. Region environment changes and its management method in [A]//Zheng Du, Yao Tandong. The ascendance of Qinghai Tibetan Plateau and its environemntal effect [C]. Beijing: Science Press, 2004: 459-554.
- [17] BARBOUR M G. Terrestrial plant ecology [M]. London: The Benjamin Publishing Company, 1980: 222-233.
- [18] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
CHEN Zuozhong, WANG Shiping. Chinese typical grassland ecosystem [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [19] 任继周. 草业科学的研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-29.
REN Jizhou. Research methods in Practaculture Science [M]. Beijing: Agriculture Press, 1998: 1-29.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil analysis of Physics and Chemistry [M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1983.
- [21] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: I. a 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
MA Keping, LIU Yuming. Measurement of biotic community diversity: I. a diversity (part 2) [J]. Chinese Biodiversity, 1994, 2(4): 231-239.
- [22] BENOIT C, NICOLASS B, FRANCOIS C. A cyclical but asynchronous pattern of fine root and woody biomass production in a hardwood forest of southern Quebec and its relationships with annual variation of temperature and nutrient availability [J]. Plant and Soil, 2003, 250: 49-57.
- [23] PU M, MITOHELL R J, JONES R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment [J]. Journal of Applied Ecology, 1997, 34: 645-656.
- [24] VOGT K A, VOGT D J, VOGT P A. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate. Climatic forest type and species [J]. Plant and Soil, 1996, 187: 159-219.
- [25] 王炜, 梁存柱, 刘钟龄, 等. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究: I. 恢复演替过程中植物种群动态的分析[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13 (4): 44-55.
WANG Wei, LIANG Cunzhu, LIU Zhongling, et al. Research on Restoring Succession of Degenerated Grassland in Inner Mongolia: I. Analysis of Plant Population Dynamics during Restoring Succession [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1999, 13 (4): 44-55.
- [26] Millikin C S, Bledsoe C S. Biomass and distribution of fine and coarse roots from blue oak (*Quercus douglasii*) trees in the northern Sierra Nevada foothills of California [J]. Plant and Soil, 1999, 214: 27-38.
- [27] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松(*Pinus koraiensis*)林及其次生林细根生物量与垂直分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3609-3617.
YANG Liyun, LUO Tianxiang, WU Songtao. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3609-3617.
- [28] 王长庭, 龙瑞军, 王启基, 等. 高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2005, 14 (4): 15-20.
WANG Changting, LONG Ruijun, WANG Qiji et al. Distribution of organic matter, nitrogen and phosphorus along an altitude gradient and productivity change and their relationships with environmental factors in the alpine meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(4): 15-20.
- [29] 杜岩功, 曹广民, 王启兰, 等. 放牧对高寒草甸地表特征和土壤物理性状的影响[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 338-343.
DUYangong, CAO Guangmin, WANG Qilan, et al. Effect of grazing on surface character and soil physical property in alpine meadow [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3): 338-343.

Vegetation roots and soil physical and chemical characteristics in degeneration succession of the *Kobresia pygmaea* meadow

WANG Changting^{1,2}, LONG Ruijun³, LIU Wei², WANG Qilan², ZHANG Li², XIANG Zeyu¹

1. College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China

Abstract: The methods of field survey and experiment analysis were applied to detect the relationship between the spatial changing of vegetation roots and soil environmental factors under different degeneration succession in an alpine meadow. The experiment plots were located in the headwater region of Yangtze and Yellow Rivers. The results showed that the obvious change of roots distribution in the *Kobresia pygmaea* meadow community, soil quantity which cultivates roots under different degeneration succession in an alpine meadow. Especially the roots and ratio roots to soils at 0-10 cm soil layer were the greatest ($P < 0.05$), and the lowest in the heavy degradation ($P < 0.05$); The plant species, community aboveground biomass and vegetation roots were shown to decrease quickly, and the plant community structure and function were changed with increased degradation levels; The effects of soil bulk density, soil moisture, N, and P contents on vertical distribution of vegetation roots (0-40 cm) and ratio roots to soils under different degeneration succession were more significant; The soil physical and chemical characteristics were influenced by disturbance (grazing) to change the grassland community biomasses, vegetation roots at different degeneration succession in an alpine meadow. The soil stability is an important factor to keep the stability of grassland production and to recover of degraded grassland. In order to evaluation and using suitable measure to ameliorate the degraded grassland, we need to understand the degraded degree of the soil and the main factors causing the degradation. Ratio of roots to soils is relatively reliable quantified index to indicate degraded level in alpine meadow; while it is difficult to sample roots, separate soils and roots in alpine meadow.

Key words: degeneration succession; vegetation roots; soil physical and chemical characteristics; alpine meadow; ratio of roots to soils