

三江源区不同建植年限人工草地植物群落与土壤微生物生理类群的变化^{*}

王启兰^{1**} 王长庭¹ 刘伟¹ 曹广民¹ 龙瑞军²

(¹中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001; ²兰州大学青藏高原生态系统管理国际中心, 兰州 730020)

摘要 通过对江河源区不同建植年限多年生人工草地植物群落的调查,分析了其土壤理化性状和土壤微生物数量的变化。结果表明:随着人工草地建植年限的增加,植物群落数量特征多呈高低高、杂类草生物量低高底、莎草生物量增加的趋势;土壤养分变化为高低高、容重为低高底、pH呈下降趋势;土壤中多数微生物的数量及微生物生物量碳含量的变化为高低高,纤维素分解菌数量逐渐升高,而反硝化菌数量逐年下降,溶磷菌数量呈低高低的动态变化。土壤微生物数量与土壤理化性状存在明显的相关关系,各生理类群明显受不同土壤理化因素的直接控制和间接调节。说明人工草地的建植及其正向恢复演替改善了土壤的理化性状,使土壤环境有利于有益微生物菌群的定居繁殖,有害微生物菌群的增殖受到抑制。

关键词 江河源区 人工草地 土壤理化性状 微生物生理类群

文章编号 1001-9332(2009)11-2646-06 **中图分类号** S154.3 **文献标识码** A

Changes in plant communities and soil microbial physiological groups of artificial grasslands established for different years in headwater region of Yangtze River and Yellow River.

WANG Qi-lan¹, WANG Chang-ting¹, LU Wei¹, CAO Guang-min¹, LONG Rui-jun² (¹Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; ²International Centre for Tibetan Plateau Ecosystem Management, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2009, 20(11): 2646-2651.

Abstract: An investigation was made on the plant communities of artificial grasslands established for different years in headwater region of Yangtze River and Yellow River, and the related soil physical and chemical properties and soil microbial physiological groups were analyzed. With the increase of establishment years, most of plant communities on the grasslands showed a "V" type change trend in their quantities, i.e., high-low-high, but the forbs biomass had a " " type change trend and the sedge biomass increased gradually. Soil nutrients presented a "V" type but soil bulk density presented a " " type change trend, while soil pH presented a decreasing trend. Most of soil microbial physiological groups and microbial biomass carbon showed a "V" type change trend, phosphorus-dissolving bacteria showed a " " type change trend, denitrifying bacteria decreased gradually, while cellulose-decomposing bacteria showed an increasing trend. The numbers of soil microbes had a close relationship with tested soil factors, and the soil microbial physiological groups were directly or indirectly affected by the soil factors. All the results indicated that the establishment of artificial grassland and the positive succession of vegetation could effectively improve soil physical and chemical properties, which benefit for the beneficial microbes to settle down and propagation, while proliferation of the non-beneficial microbes was inhibited.

Key words: headwater region of Yangtze River and Yellow River; artificial grassland; soil physical-chemical properties; physiological groups of microbe

*国家自然科学基金重点项目(30730069)和中国科学院资源环境领域野外台站研究基金项目资助。

**通讯作者。E-mail: wql@nwipb.ac.cn

2009-06-02收稿, 2009-08-31接受。

近年来,随着人类活动的加剧,三江源区草地生态环境日趋恶化,草地鼠虫害问题突出^[1],因此草地生态系统的恢复和重建受到广泛关注^[2-3]。草地生态系统的恢复不仅是土壤结构及其理化性质的恢复,也是草地植物区系成分、地上生物量、植物密度和盖度及主要种群数量的恢复^[4]。研究表明,草地恢复过程中,总产草量增加,植物种类成分发生变化,而土壤有机质含量下降^[5-6]。然而,植被的自然恢复是一个非常缓慢的过程,3年内植被盖度不足10%,而人工草地2年内植被盖度可达到80%^[7]。

鉴于草地退化对全球生态安全、环境质量及社会发展的负面影响日益严重,从恢复生态学角度研究退化草地生态系统的恢复与重建对策,尤其是人工草地的建立已成为研究草原生态问题的最重要组成部分,并将继续成为21世纪国际环境科学界共同关注的热点问题。在生产实践中,如何维护高效、持久的人工草地,提高人工草地的初级生产力和经济价值和草地质量已成为人工草地研究中的关键问题^[8]。

青藏高原高寒地区退化草地生态系统中,人工草地建植具有创造新的草地生产力和改善草地生态环境的双重功能^[9]。因此,清楚了解江河源区人工草地的群落结构和功能,对实现人工草地的高效培育和合理利用,全面发挥其生产和生态功能具有重要的指导意义。

在草地生态系统的退化/恢复中,土壤退化后恢复时间要远长于草地植被的恢复时间^[10]。土壤是植物生长的基础,对草地土壤进行研究,能够较深入地了解草地生态系统受损状况和恢复程度。为此,本文从三江源区不同建植年限人工草地植物群落特征和土壤微生物生理类群数量的变化入手,探讨高寒地区退化草地人工恢复过程中植被和土壤的恢复过程,旨在为草地生态系统的恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省果洛州达日县和玛沁县(96°54'—101°59' E, 32°31'—35°38' N),平均海拔4200 m。该地区为典型的高原大陆性气候,无四季之分,仅有冷(4—9月)、暖(10月至次年3月)季之别,冷季较长,干燥而寒冷,暖季短暂而凉爽;温度年差较小而日差较大,太阳辐射强烈,年均气温-1.3℃;年均降水量420~560 mm,多集中在5—9月,年蒸发量1119.07 mm,无绝对无霜期;土壤为高山草甸

土和高山灌丛土。小嵩草草甸为该地区主要的冬春草场,建群种为小嵩草(*Kobresia pygmaea*),主要伴生种有矮嵩草(*K. humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)、羊茅(*Festuca ovina*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等。

1.2 样地选择与野外调查

在果洛州玛沁县和达日县分别选择大武镇、军牧场、窝赛乡和满掌乡4个研究区域,以建植期分别为4、7、9和14年的多年生人工草地为试验样地,人工草地均为垂穗披碱草+冷地早熟禾(*Poa crymophila*) + 中华羊茅(*Festuca sinensis*) + 星星草(*Puccinellia tenuiflora*)混播地,样地面积均为50 m × 50 m,土壤均为高山草甸土。4个研究区域均为冬春草场,夏季不利用。

2004年8月中下旬,在4个样地内分别随机选取10个50 cm × 50 cm样方,进行植物物种数、盖度、高度、频度等群落特征调查,然后齐地面分种剪草,烘干称量。剪去植物地上部分后,在50 cm × 50 cm样方的中心区域划出25 cm × 25 cm样方,采用挖掘法^[11]采集植物地下根系(0~40 cm),清水冲洗干净后烘干称量。

1.3 测定方法

2004年8月,在25 cm × 25 cm样方中采集植物地下根系的同时,沿土壤剖面采集0~40 cm土壤样品,过2 mm筛,保存于4℃冰箱中。微生物生理类群的数量采用稀释平板法和MPN法测定^[10],微生物生物量碳含量采用氯仿熏蒸-0.5 mmol · L⁻¹ K₂SO₄抽提^[12]有机质分析仪(TOC-5000A, Shimadzu)测定。以“S”形取样法用土钻在样地内选10个样点,分层采集0~40 cm的土壤,10个样点的土样风干后用常规分析方法测定土壤pH、土壤水分、有机质、全氮、速效氮、全磷和速效磷含量^[13]。用环刀法测定土壤容重。

1.4 数据处理

采用DPS 7.0和SPSS 13.0软件分析植物群落-土壤因子-微生物生理类群数量之间的关系。

2 结果与分析

2.1 人工草地的植物群落特征

由表1可以看出,在人工草地建植初期,由于人为的维护和施肥措施,群落的盖度、地上/地下生物量及禾草类生物量明显增高($P < 0.05$),物种主要为人工播种的垂穗披碱草、冷地早熟禾、星星草及少数杂类草,与禾草类生物量相比,杂类草生物量很

表 1 不同建植年限人工草地植被的数量特征

Tab 1 Quantitative characteristics of artificial grassland at different cultivated periods (mean \pm SE, $n = 10$)

建植年限 Cultivated period (a)	盖度 Coverage (%)	物种数 Species number	地上生物量 Aboveground biomass ($g \cdot m^{-2}$)	地下生物量 Belowground Biomass ($g \cdot m^{-2}$)	禾草生物量 Grass biomass ($g \cdot m^{-2}$)	莎草生物量 Sedge biomass ($g \cdot m^{-2}$)	杂类草生物量 Forbes biomass ($g \cdot m^{-2}$)
4	85a	6.50 \pm 0.39c	440.95 \pm 1.89a	1296.92 \pm 2.66a	368.22 \pm 1.46a	-	72.73 \pm 0.84c
7	50d	6.00 \pm 0.31c	182.73 \pm 1.63c	454.90 \pm 2.54b	-	-	182.73 \pm 1.64b
9	56c	8.33 \pm 0.39b	219.88 \pm 0.87bc	505.06 \pm 2.12b	8.96 \pm 0.50c	-	210.88 \pm 0.91a
14	80b	19.67 \pm 0.43a	255.01 \pm 1.58b	1190.61 \pm 8.20a	124.21 \pm 1.36b	69.36 \pm 1.34	61.44 \pm 0.99d

同列中不同字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values in the same column marked with different letter indicated significant differences at 0.05 level 下同 The same below.

表 2 不同建植年限人工草地 0~40 cm 土壤理化特征

Tab 2 Soil physical-chemical properties (0-40 cm) of artificial grassland at different cultivated periods (mean \pm SE, $n = 10$)

建植年限 Cultivated period (a)	容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	湿度 Soil moisture (%)	pH	有机质 Organic matter ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮 Total N ($g \cdot kg^{-1}$)	有效氮 Available N ($mg \cdot kg^{-1}$)	全磷 Total P ($g \cdot kg^{-1}$)	有效磷 Available P ($mg \cdot kg^{-1}$)
4	1.34 \pm 0.04b	20.14 \pm 0.17b	7.76 \pm 0.01a	105.63 \pm 2.00a	2.22 \pm 0.08a	19.28 \pm 0.54a	0.81 \pm 0.07a	4.85 \pm 0.11a
7	1.53 \pm 0.06a	10.41 \pm 0.42d	6.53 \pm 0.01b	75.22 \pm 3.86c	1.34 \pm 0.11c	10.50 \pm 0.79b	0.60 \pm 0.11b	2.87 \pm 0.19b
9	1.51 \pm 0.04a	13.81 \pm 0.38c	6.50 \pm 0.01b	65.11 \pm 1.31d	1.16 \pm 0.03c	9.70 \pm 0.42b	0.52 \pm 0.04b	2.90 \pm 0.16b
14	1.17 \pm 0.02c	26.07 \pm 0.39a	6.36 \pm 0.01b	84.84 \pm 2.11b	1.88 \pm 0.04b	18.27 \pm 0.37a	0.61 \pm 0.04b	4.80 \pm 0.22a

低;在建植第 7 年,群落盖度、地上/地下生物量明显下降,物种主要为杂类草,其生物量明显升高;第 9 年,草地的群落盖度、物种数、地上/地下生物量、杂类草生物量都有所升高,又出现禾草,但其生物量很低;在第 14 年,草地群落的盖度、物种数、地上/地下生物量、禾草类生物量明显升高,已有莎草科物种生长,而杂类草生物量明显降低。

2.2 人工草地土壤理化性状

由表 2 可以看出,土壤容重在第 4 年和第 14 年明显较低 ($P < 0.05$),而在第 7 年和第 9 年相对较高,且二者间没有明显差异 ($P > 0.05$),总体呈低-高-低的动态变化;与之相反,土壤湿度、有机质、全氮、有效氮、全磷、有效磷在建植初期和后期均明显高于中期 ($P < 0.05$),呈高低高的趋势;土壤 pH 随着建植年限的增长呈逐年下降的趋势,其中第 4 年土壤 pH 显著高于其他年限 ($P < 0.05$),第 7 年、第 9 年和第 14 年之间差异不明显 ($P > 0.05$)。

2.3 人工草地的土壤微生物生理类群数量变化

由表 3 可以看出,随建植年限的增加,氨化菌、硝化菌、自生固氮菌数量呈高低高变化。其中,氨化菌和硝化菌第 4 年显著高于其他年限,而第 7 年和第 9 年显著低于其他年限 ($P < 0.05$);自生固氮菌数量在不同年限之间差异显著 ($P < 0.05$);反硝化菌数量呈下降趋势,且以第 4 年最高、第 14 年最低 ($P < 0.05$);纤维素分解菌数量逐渐升高,为第 14 年 > 第 9 年 > 第 4 和第 7 年,除第 4 年和第 7 年之

间差异不显著 ($P > 0.05$)外,其余均存在显著差异 ($P < 0.05$);溶磷菌数量的变化则呈低-高-低变化趋势,为第 9 年 > 第 7 年 > 第 14 年 > 第 4 年,不同年限之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。不同生理类群数量为:氨化菌和自身固氮菌 > 反硝化菌 > 纤维素分解菌 > 硝化菌 > 溶磷菌。

由图 1 可以看出,土壤微生物生物量碳含量变化趋势与植物生物量、土壤养分基本一致,为建植 14 年最高,4 年次之,7 年最低,不同年限之间微生物生物量碳含量差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 微生物功能群数量与土壤因子之间的相关关系

以土壤因子为自变量,微生物生理群数量为因

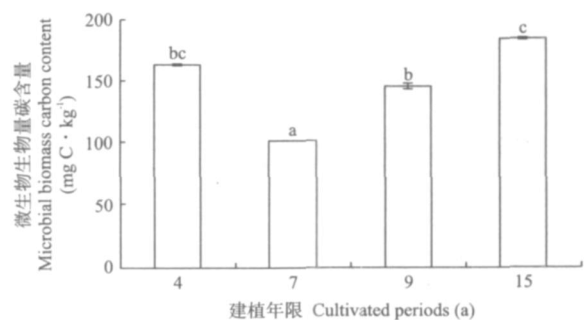


图 1 不同建植期人工草地 0~40 cm 土壤微生物生物量碳含量

Fig 1 Microbial biomass carbon in 0-40 cm soil of artificial grassland at different cultivated periods (mean \pm SE, $n = 10$).

不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters indicated significant differences at 0.05 level

表 3 不同建植年限人工草地 0~40 cm 土壤微生物功能群数量

Tab 3 Soil microorganism numbers (0-40 cm) of artificial grassland at different cultivated periods (mean \pm SE, n = 10)

建植年限 Cultivated period (a)	氨化菌 Ammonifiers (10^7 cfu \cdot g $^{-1}$)	硝化菌 Nitrobacter (10^3 cell \cdot g $^{-1}$)	反硝化菌 Denitrifying bacteria (10^5 cell \cdot g $^{-1}$)	自身固氮菌 Azotobacter (10^7 cfu \cdot g $^{-1}$)	纤维素分解菌 Cellulose decomposing bacteria (10^5 cfu \cdot g $^{-1}$)	溶磷菌 Phosphorus dissolving bacteria (10^3 cell \cdot g $^{-1}$)
4	4.95 \pm 0.16 c	113.88 \pm 2.32 c	69.76 \pm 1.96 c	2.63 \pm 0.12 d	1.66 \pm 0.03 a	3.73 \pm 0.11 a
7	0.92 \pm 0.07 a	38.73 \pm 2.04 a	59.53 \pm 1.34 b	0.25 \pm 0.00 a	1.86 \pm 0.05 a	20.44 \pm 1.05 c
9	0.78 \pm 0.03 a	35.45 \pm 1.03 a	56.46 \pm 1.05 b	0.64 \pm 0.01 b	2.39 \pm 0.08 b	27.56 \pm 1.34 d
14	2.44 \pm 0.03 b	57.82 \pm 0.71 b	25.82 \pm 1.05 a	1.69 \pm 0.04 c	4.57 \pm 0.13 c	16.73 \pm 1.19 b

表 4 微生物功能群数量与土壤因子的相关系数

Tab 4 Correlation coefficients between microbe number and soil factors

	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆
X ₁	-0.3204	0.0734	0.644**	-0.4986	-0.7524**	-0.1340
X ₂	0.3879	-0.0943	-0.6539**	0.5217*	0.809**	0.1026
X ₃	0.7511**	0.9158**	0.8207**	0.6366*	-0.6914**	-0.922**
X ₄	0.9639**	0.775**	0.3107	0.9344**	-0.0885	-0.7693**
X ₅	0.9116**	0.6222*	0.1063	0.9083**	0.1279	-0.623*
X ₆	0.8209**	0.4557	-0.1193	0.8642**	0.3458	-0.4515
X ₇	0.7711**	0.6296*	0.4123	0.6564**	-0.2073	-0.6821**
X ₈	0.7200**	0.3505	-0.2167	0.7790**	0.4183	-0.3400

X₁: 容重 Bulk density; X₂: 土壤湿度 Soil moisture; X₃: pH; X₄: 有机质 Organic matter; X₅: 全氮 Total N; X₆: 有效氮 Available N; X₇: 全磷 Total P; X₈: 有效磷 Available P; Y₁: 氨化菌 Ammonifier; Y₂: 硝化菌 Nitrobacter; Y₃: 反硝化菌 Denitrifying bacteria; Y₄: 自身固氮菌 Azotobacter; Y₅: 纤维素分解菌 Cellulose decomposing bacteria; Y₆: 溶磷菌 Phosphorus dissolving bacteria * P < 0.05; ** P < 0.01.

变量,进行逐步回归分析.结果(表 4)表明,参与氮素代谢的微生物中,氨化菌与 X₃、X₄、X₅、X₆、X₇、X₈ 因子显著相关,硝化菌与 X₃、X₄、X₅、X₇ 因子显著相关,反硝化菌与 X₁、X₂、X₃ 因子显著相关,自身固氮菌与 7 种土壤因子(土壤容重除外)有显著的相关性. X₃、X₄、X₆ 因子对上述 4 种氮素代谢微生物均表现出显著的直接正效应,其直接通径系数(P_y)依次为 0.0521、1.56031、0.7916、0.0771、0.8198、1.7907、0.0333、0.1299、0.5657、0.1599、2.5856、1.1332;而 X₅、X₈ 因子则表现出显著的直接负效应,其直接通径系数(P_y)依次为 -0.5605、-0.6770、-0.5458、-0.5888、-1.8788、-0.4042、-1.7471、-1.1232 决定系数(R²)均 > 0.9881,剩余通径系数(P_e)均 < 0.1072

参与碳素代谢的微生物中,纤维素分解菌与 X₁、X₂、X₃ 因子显著相关(表 4). X₂、X₅ 表现为显著的直接正效应, P_y 依次为 1.3245、1.0769, X₁、X₃、X₄、X₆ 则为显著的直接负效应, P_y 依次为 -0.0363、-0.0456、-0.8685、-1.0177, R² 为 0.9931, P_e 为 0.0833. 参与磷素代谢的溶磷菌与 X₃、X₄、X₅、X₇ 因子显著相关(表 4). X₂、X₅、X₇、X₈ 因子表现出显著的直接正效应, P_y 依次为 0.4309、2.8708、0.3228、1.1487, X₁、X₃、X₄、X₆ 则为显著的直接负效应, P_y 依次为 -0.4239、

-0.3722、-1.7280、-3.5261, R² 为 0.9662, P_e 为 0.1840. 通径分析表明,土壤微环境中一个土壤因子的变化受土壤其他诸多因子的制约,各种因子之间通过相互调控,控制微环境的立地条件,从而直接或间接调控微生物的代谢增殖及其生物活性的大小.

3 讨 论

3.1 植物群落的变化

植被与土壤的关系是植物生态学研究的一个重要内容.在同一气候条件下,土壤分异导致植被的变化,植物的生长又可以改善土壤生境^[14-15].人工草地与天然草地在生态条件和生理机制上虽存在一些明显的差异,但高寒地区非生物的环境压力如:低温、干旱、UV-B 辐射,加之放牧干扰,植物生长及其生产力受到很大的影响^[16],加剧了不同时空尺度上群落的斑块化和土壤的异质性^[17],使人工草地具有向天然草地演替的潜力^[18].

本研究中的人工草地是在“黑土型退化草地上,通过翻耕、耙磨、播种、施肥和镇压等人为措施建植的混播草地.在建植初期进行杂草、施肥等维护措施,使第 4 年的群落组成主要以禾草为主,生产力较高.随着利用年限的增加,由于邻近天然草地的影响和各种植物种子的入侵,人工草地的物种组成和群落结构逐渐发生改变.第 7 年,原群落优势种的丰

富度明显下降,主要以杂类草为主,群落处于退化阶段.第9年,随着甘肃马先蒿等其他物种的入侵,地表出现苔藓结皮,禾草生长,群落的数量特征虽很低,但呈正向演替的恢复趋势.第14年,群落的盖度、物种数等明显升高,有莎草出现,杂类草明显减少,群落呈相对稳定的状态(表1).

3.2 土壤理化性状的变化

土壤作为植被演替的主要驱动力,其理化特性随人工草地的建植和群落的演替而改变^[19],土壤环境的变化又影响植物的种间竞争和物种更替,为植物群落的演替奠定了基础^[20].植物对土壤养分资源的竞争是决定物种多样性和群落演替的主要因素^[21],物种丰富度与养分含量有紧密的联系^[22].

由表2可以看出,第4和14年人工草地的土壤湿度、有机质、有效养分等显著高于第7年和第9年.第4年主要因人为维护所致;第7年至第9年,无外源肥料的施入,加之毒杂草的侵入,土壤营养不足以弥补植物生长的消耗,造成土壤养分的低下和诸多土壤性状的下降,使植物定居和生态位的分异受到影响^[23-24];第14年,植物群落步入恢复演替状态,高的植被盖度不仅减少了土壤水分的蒸发,同时为土壤提供丰富的有机物来源,有机质逐渐积累,使土壤养分含量增加,为土壤生化代谢创造了条件,促进了土壤养分循环和土壤形成过程^[19].进一步说明土壤环境的改善有利于外来物种的定居、种子萌发、根系的扩展及其对养分的吸收^[25].

3.3 土壤微生物生理类群的变化

植物的生长对土壤微生物及其代谢活性有很大的影响,枯枝落叶的产量及其品质对微生物群落^[26]、微生物生物量^[27]和活性^[28]有深刻的影响.本研究中,与土壤有效氮代谢有关的菌类(氨化菌、硝化菌和自身固氮菌)和微生物生物量碳都呈现高低高的变化趋势(表3,图1),说明植物-土壤养分-微生物之间存在着互利关系.随着人工草地建植年限的增加,高海拔地区人工草地群落为了适应高寒环境,形成发达的根系和较高的地下生物量,这与纤维素分解菌升高的趋势一致.第14年草地土壤养分和微生物群落数量的再次升高可能与其较高的地下生物量密切相关.随着建植期的延长,反硝化菌数逐年下降.说明人工草地步入正向演替轨道,土壤养分的有效积累确保了系统功能的正常运转^[29-30],促进了植物群落生物种类的多样性和结构的复杂性.

3.4 土壤因子与土壤微生物之间的关系

从回归分析(表4)可以看出,人工草地土壤有

机质、全氮、有效氮、有效磷亏缺,限制了土壤有机质的积累,加之干燥的土壤环境,使大多数微生物功能群的繁殖代谢受到抑制.随着人工草地建植年限的增加,土壤容重、pH等土壤因子得到改善,为微生物数量的增殖和植物群落的进一步发展创造了有利的条件.虽然一些土壤因子与部分微生物生理类群的相关性不明显,直接途径系数较小,但它们的间接途径系数比较大.如有机质对反硝化菌的 P_{y3} 为0.5657,而其通过调节,全氮、有效氮对氨化菌的间接途径系数分别达-1.8265和2.4979;土壤容重对溶磷菌的增殖表现出弱的抑制作用,其直接途径系数为-0.4239,而其通过调节全氮和有效氮作用于溶磷菌的间接途径系数分别达-1.3646和2.460,说明土壤因子之间、土壤因子与土壤微生物之间存在着紧密的关系.它们互相制约、相互调控,共同控制着土壤生态系统的发展.

参考文献

- [1] Ma Y-S (马玉寿), Lang B-N (郎百宁), Li Q-Y (李青云), *et al*. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow river source region. *Pratacultural Science* (草业科学), 2002, **19**(9): 1-5 (in Chinese)
- [2] Gao Y-Z (高英志), Wang S-P (汪诗平), Han X-G (韩兴国), *et al*. Soil nitrogen regime and the relationship between aboveground green phytobiomass and soil nitrogen fractions at different stocking rates in the Xilin River basin, Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(3): 285-293 (in Chinese)
- [3] Yang Y-H (杨颖慧), Zhang J-H (张锦华), Yang C-H (杨春华). Effects of ecological restoration of degraded grassland on soil physical characteristics: As an example of trampling disturbance on *Kobresia humilis* grassland along Qingzang Road in north Tibet. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20**(5): 56-59 (in Chinese)
- [4] Wang W (王炜), Liu Z-L (刘钟龄), Hao D-Y (郝敦元), *et al*. Research on the restoring succession of the degenerated grassland in Inner Mongolia. Basic characteristics and driving force for restoration of the degenerated grassland. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1996, **20**(5): 449-459 (in Chinese)
- [5] Fisher NM, Dries DHK. Vegetation succession and the effect of management on weedy species in an old arable field under set-aside. *Proceeding of A Conference on Crop Protection in Northern Britain*, Dundee, UK, 1993
- [6] Domaar JF, Smoliak L. Recovery of vegetative cover and soil organic matter during revegetation of abandoned farmland in a semiarid climate. *Journal of Rangeland Management*, 1985, **38**: 487-491
- [7] Rong Y-P (戎郁萍), Han J-G (韩建国), Wang P

- (王 培). Effects of different range restorations oil soil and vegetation of Russian wildrye (*Psathyrostachys juncea*) pasture. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2002, **11**(1): 17-23 (in Chinese)
- [8] Niu S-L (牛书丽), Jiang G-M (蒋高明). Function of artificial grassland in restoration of degraded natural grassland and its research advance. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(9): 1662-1666 (in Chinese)
- [9] Zhou H-K, Zhao X-Q, Tang Y-H, et al. Alpine grassland degradation and its control in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers, China. *Grassland Science*, 2005, **51**: 191-203
- [10] Microbiology Department of Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所微生物室). Research Method of Soil Microbiology. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese)
- [11] Wang C-T (王长庭), Wang Q-J (王启基), Long R-J (龙瑞军), et al. Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(2): 240-245 (in Chinese)
- [12] Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**: 703-707
- [13] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). Soil Physical-Chemical Analysis. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983 (in Chinese)
- [14] Chen G (陈刚), Sun G-R (孙国荣), Peng Y-Z (彭永臻), et al. Effect of nitrogen accumulation in *Puccinellia tenuiflora* grassland on the succession of vegetation in Songnen alkaline grassland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 2031-2041 (in Chinese)
- [15] Yao H, He Z, Wilson MJ, et al. Microbial biomass and community structure in a sequence of soils with increasing fertility and changing land use. *Microbial Ecology*, 2000, **40**: 223-237
- [16] Wu G, Wei Z-K, Wang Y-X, et al. The mutual responses of higher plants to environment: Physiological and microbiological aspects. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007, **59**: 113-119
- [17] McIntyre S, Lavorel S, Tremont RM. Plant life history attributes: Their relationship to disturbance response in herbaceous vegetation. *Journal of Ecology*, 1995, **83**: 31-34
- [18] Wang G (王刚), Jiang W-L (蒋文兰). Study on the Population Ecology in Artificial Pasture. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1998: 232-235 (in Chinese)
- [19] Qu G-H (曲国辉), Guo J-X (郭继勋). The relationship between different plant communities and soil characteristics in Songnen Grassland. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2003, **12**(1): 18-22 (in Chinese)
- [20] Zhang Q-F (张庆费), You W-H (由文辉). Effect of plant community succession on soil chemical properties in Tiantong, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(1): 19-22 (in Chinese)
- [21] Whittaker RH. Dominance and diversity in land plant communities. *Science*, 1965, **147**: 250-260
- [22] Houle G. No evidence for interspecific interactions between plants in the first stage of succession on coastal dunes in subarctic Quebec, Canada. *Canadian Journal of Botany*, 1997, **75**: 902-915
- [23] Kellogg CH, Bridgman SD, Leicht SA. Effects of water level, shade and time on germination and growth of freshwater marsh plants along a simulated successional gradient. *Journal of Applied Ecology*, 2003, **91**: 274-282
- [24] Silvertown J, Dodd ME, Gowing DJG, et al. Hydrologically defined niches reveal a basis for species richness in plant communities. *Nature*, 1999, **400**: 61-63
- [25] Hao W-F (郝文芳), Liang Z-S (梁宗锁), Chen C-G (陈存根), et al. Study of the different succession stage community dynamic and the evolution of soil characteristics of the old-field in Loess Hills Gully. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2005, **21**(8): 226-231 (in Chinese)
- [26] Aneja MK, Shama S, Munch JC, et al. RNA fingerprinting - A new method to screen for differences in plant litter degrading microbial communities. *Journal of Microbiological Methods*, 2004, **59**: 223-231
- [27] Rajaniemi TK, Allison VI. Abiotic conditions and plant cover differentially affect microbial biomass and community composition on dune gradients. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**: 102-109
- [28] Hu Y-L (胡亚林), Wang S-L (汪思龙), Huang Y (黄宇), et al. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(10): 2662-2668 (in Chinese)
- [29] Bever JD. Host-specificity of AM fungal population growth rates can generate feed-back on plant growth. *Plant and Soil*, 2002, **244**: 281-290
- [30] Loreau M. Microbial diversity, producer-decomposer interactions and ecosystem processes: A theoretical model. *Proceedings of the Royal Society B: Biology Science*, 2001, **268**: 303-309

作者简介 王启兰,女,1964年生,副研究员.主要从事微生物生态学研究,发表论文40余篇. Email: wql@mwipb.ac.cn

责任编辑 李凤琴