

三江源区不同建植年代人工草地群落演替与土壤养分变化*

王长庭^{1,2**} 龙瑞军³ 王启兰¹ 刘伟¹ 景增春¹ 张莉^{1,4}

(¹中国科学院西北高原生物研究所 西宁 810001)

(²西南民族大学生命科学与技术学院 成都 610041)

(³兰州大学草地农业科技学院 兰州 730070)

(⁴中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 研究了三江源区不同建植期人工修复草地在不同演替阶段毒杂草[主要是甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)]的入侵规律、数量特征,植物群落物种组成、生物量和草地质量以及土壤养分、微生物活性的变化规律。结果表明,不同建植期人工修复草地植物群落的种类组成、植物功能群组成和群落数量特征存在显著差异。随着演替时间的推移,人工草地群落盖度、高度、物种数、生物量和多样性指数均表现出“V”字型变化规律,杂类草——甘肃马先蒿的数量特征变化尤为明显,在4 a的人工草地群落中开始局部入侵,在5~6 a的人工草地群落中大面积入侵,其入侵速度、入侵面积达到高峰期。土壤的含水量、容重、土壤有机质、氮素和磷素在演替过程(7 a、9 a草地)中逐渐降低,到一定时期又逐步增加;随着演替的进行,不同建植期人工草地的土壤微生物生物量碳和酶活性均呈“V”字型变化。对于退化生态系统的恢复首先是植被恢复,其次是土壤肥力的恢复。土壤有机质等养分的积累、微生物活性的改善不仅能使土壤-植物复合系统的功能得以恢复,同时也能促进物种多样性的形成,有利于人工草地群落稳定性的提高。在试验区尽管植被恢复演替进行得比较缓慢,但从土壤发展的角度看,仍属进展演替。所以,在退化高寒草甸的恢复过程中,若降低和有效控制外界的干扰(如围栏封育),可为退化草地恢复提供繁殖体与土壤环境,实现人工草地逐步向恢复(正向)演替进行。图3表6参34

关键词 三江源区;甘肃马先蒿;群落演替;土壤养分;人工修复草地

CLC S812 (24)

Community Succession of Differently Aged Artificial Grasslands and Their Soil Nutrient Changes in Three Rivers' Source Regions in Qinghai, China*

WANG Changting^{1,2**}, LONG Ruijun³, WANG Qilan¹, LIU Wei¹, JING Zengchun¹ & ZHANG Li^{1,4}

(¹Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

(²College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China)

(³College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730070, China)

(⁴Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Restoration starts at the degraded systems with impaired structure and function due to anthropogenic or natural causes. Ecological restoration means restoring both ecosystem structure, including species composition and trophic interaction, and ecosystem function. Soil is a fundamental component in every terrestrial ecosystem, making restoration a vital process during ecological restoration. This study was conducted to examine the invasion regulation and quantitative characteristics of forbs (mainly *Pedicularis kansuensis*); species composition, biomass and grassland quality; changes in soil nutrients and soil microbial activities of the differently aged artificial grassland communities in the source regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang rivers. The results showed that the species composition, functional group composition, and quantitative characters of the plant communities varied greatly in the artificial grasslands cultivated in different years. The coverage, height, species number, biomass, and diversity index of the communities had a “V” type change, which was consistent with the changing pattern of soil moisture, soil bulk density, soil organic matter, N, P, soil microbial biomass C, and soil enzyme activity with the succession processes of artificial grasslands. There were also changes in plant species composition, community structure, and environmental factors (e.g., soil moisture, soil resources, and soil enzyme activity) at the different succession stages in the artificial grassland ecosystem. The restorations of vegetation and soil fertility are important to restore the deteriorated ecosystem. Understanding how to improve soil microbial activities and accumulate soil organic matter is essential to restore the function of plant-soil interaction, enrich plant species diversity and enhance plant community stability. In the restoration

收稿日期: 2008-12-17 接受日期: 2009-03-20

*国家自然科学基金重点项目(No. 30730069)资助 Supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 30730069)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wcht6@hotmail.com or wct@nwipb.ac.cn)

process of the degraded grasslands, if disturbance was effectively controlled, suitable seeds were available and soil nutrients were provided, the vegetation restoration could be achieved in the artificial grasslands. Fig 3, Tab 6, Ref 34

Keywords source region of three rivers; *Pedicularis kansuensis*; plant community succession; soil nutrient; artificial grassland
CLC S812 (24)

当前,在人口、资源和放牧等压力之下,草地健康状况日趋恶化,草地不断退化和消失,生态灾难日益严重,草原牧区的生态难民事件已非个例,这已严重影响广大牧区、半牧区和少数民族地区社会经济的发展。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,尤其是人工草地已成为草原生态问题的重要组成部分,并将继续成为21世纪国际环境科学界关注的热点^[1]。天然草地要得到真正意义上的恢复,就必须做到适当放牧,减轻人为干扰,合理利用是最好的保护。而退化草地的恢复和草地畜牧业的发展是一对矛盾体,矛盾的焦点在于饲草料问题。正是由于这种原因,人工草地得以迅速发展。因此,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并保证草地质量已成为研究人工草地的关键,也是恢复与重建江河源区严重退化“黑土滩”草地的重要手段之一^[2]。

采用多年生禾本科牧草建植的人工草地利用3~5 a后,因管理和利用不当(如放牧等)出现了特征不一的不同演替阶段的植被类型,特别是建植后5~8 a间的人工草地由于放牧压力过大,管理措施跟不上,导致群落逆向演替发展(包括土壤的逆向演替)^[2],毒杂草(甘肃马先蒿*Pedicularis kansuensis*)大量入侵,人工草地的基本特征基本消失,草地质量显著下降,但这并不意味着草地完全退化和毫无放牧利用价值。这个演替阶段如果实施围栏封育(不要破坏此阶段的植被和土壤),合理利用和管理草地,可能为一些优良牧草的侵入、定居和繁衍,为高寒草甸的恢复演替创造有利的环境条件[因为大量的杂类草入侵和繁衍,在群落中的适合度有所提高,特别是一些克隆植物通过强大的克隆繁殖功能,形成一些密集的匍匐茎网状结构,提高了植被覆盖度,减少土壤水分的蒸发,这在一定程度上阻止了植物群落向盖度很低且容易沙化的极度退化(“黑土滩”)阶段演替]。

相对于原来的生态系统而言,生态恢复意味着生态系统结构(物种组成、营养作用)的恢复和生态功能(关键的生态系统过程、主要元素地球化学循环的改变)的恢复^[3]。土壤退化和土地利用的改变是控制陆地生态系统碳、氮收支的重要影响因子之一。微生物生物量碳的变化经常被用来评价土地利用或管理对土壤有机碳含量和土壤质量的影响^[4]。土壤结构改变而引起的土壤特征也影响着原有植被的重新建立^[5]。土壤养分以各种无机物(如:铵、磷酸盐)和有机物(如:氨基酸、核酸)形式存在,并且通过土壤酶(如:蛋白酶、核糖核酸酶)的活动转化为植物易于吸收的成分^[6]。土壤微生物量虽然只占土壤有机质库中的很小部分,主要包括生物量碳和氮,但却是控制生态系统中碳、氮和其它养分流的关键^[7]。土壤微生物量对环境的变化极为敏感,能够较早地指示生态系统功能的变化^[8]。微生物量的任何变化将会影响养分的循环和有效性^[9-10]。土壤酶既是土壤有机物转化的执行者,又是植

物营养元素的活性库^[11]。土壤酶活性与土壤理化特征^[12]、微生物群落结构^[13]、植被^[14]、干扰^[15-16]、演替^[17]有关。土壤是陆地生态系统中的基本成分,因此土壤的恢复是生态恢复过程中极其重要的过程。

因此,我们就三江源区不同建植期人工草地毒杂草(主要是甘肃马先蒿)的入侵规律、数量特征,植物群落物种组成、生物量和草地质量,尤其是土壤养分、微生物活性在人工草地恢复演替过程中的变化等作一些尝试性研究,为探索三江源区人工草地的演替规律和稳定性积累经验,也为三江源区退化草地的恢复与重建提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究区位于三江源腹地青海省果洛州达日县和玛沁县(32°31' N~35°38' N, 96°54' E~101°59' E),平均海拔4 200 m。属典型的高原大陆性气候,无四季之分,仅有冷暖季之别,冷季较长、干燥而寒冷,持续时间达7~8 mo,暖季短暂而凉爽,长4~5 mo。温度年差较小而日差较大,太阳辐射强烈。年均气温-1.3 °C,月平均最高气温24.6 °C,月平均最低气温-34.5 °C。年均降水量420~560 mm,多集中在5~9月,年蒸发量1 119.07 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*),主要伴生种有矮蒿草(*K. humilis*)、异针茅(*Stipa aliena*)、羊茅(*Festuca ovina*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、双叉细柄茅(*Ptilagrostis dichotoma*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查与取样 分别选择青海省果洛州玛沁县军牧场、达日县窝赛乡的5个研究区域,建植期分别为4 a、5 a、7 a、9 a、14 a的人工草地(均为冬春草场)为试验样地(表1),样地面积均为50 m×50 m,5块人工草地均为垂穗披碱草+短根茎密丛禾冷地早熟禾(*P. cryrnophila*)+星星草(*Puccinellia tenuiflora*)混播地,土壤均为高山草甸土。

2005~2006年8月中下旬在上述5个样地内分别随机选取10个50 cm×50 cm样方进行植物群落特征(所有植物种的分盖度、高度和频度,以及植物群落的盖度)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^[18]采集植物地下根系(0~40 cm),清水冲洗干净后烘干称量。

1.2.2 甘肃马先蒿面积测定 在上述5个人工草地中随机用皮卷尺分别量取长50 m的两条样带,样带每隔5 m设置一个1 m×1 m测定样方,每条样带10个样方,共计20个。分别测定甘肃马先蒿等入侵毒杂草的面积、盖度、高度及生物量。

1.2.3 土壤理化性质测定 在25 cm×25 cm样方中,采集植物地下根系的同时,用土壤剖面法分层采集土壤样品(0~40

表1 研究地点的地理位置和环境特征
Table 1 Environmental characteristics and geographical location of the study area

群落建植年龄 Community age (t/a)	海拔 Altitude (h/m)	方位 Location	植被组成 Vegetation composition	土壤类型 Soil type
4	3928	34° 22.469' N 100° 28.546' E	主要优势种是禾本科植物(垂穗披碱草、冷地早熟禾、星星草),次优势种为杂类草(甘肃马先蒿、直立梗唐松草、细叶亚菊等) 群落盖度: 80%~90% The dominant species are grasses (<i>Elymus nutans</i> , <i>Poa cryrnophila</i> , and <i>Puccinellia tenuiflora</i>) with many accompanying forbs (<i>Pedicularis kansuensis</i> , <i>Thalictrum alpinum</i> , <i>Ajania tenuifolia</i> and so on) and an overall cover of 80%~90%	
5	3914	34° 22.828' N 100° 27.603' E	植物群落由禾本科(垂穗披碱草、冷地早熟禾等)和杂类草(主要是甘肃马先蒿)植物组成. 群落盖度: 70%~82% The community consists of grasses (<i>E. nutans</i> , <i>P. cryrnophila</i> and so on) and forbs (<i>P. kansuensis</i>). Overall cover of 70%~82%	
7	4063	33° 34.444' N 99° 54.080' E	植物群落仅由杂类草(甘肃马先蒿、直立梗唐松草、细叶亚菊、蜜花香薷、藏忍冬等)植物组成. 群落盖度: 45%~52% The dominant species are only forbs (<i>P. kansuensis</i> , <i>T. alpinum</i> , <i>A. tenuifolia</i> , <i>Ersholtzia densa</i> , <i>Lonicera tibetica</i> and so on). The cover of community is 45%~52%	高山草甸土 Alpine meadow soil
9	4070	33° 34.411' N 99° 54.179' E	主要优势种是杂类草植物(甘肃马先蒿、直立梗唐松草、细叶亚菊、高山唐松草、蜜花香薷、白苞筋骨草等),其次为禾本科植物. 群落盖度: 50%~60% The dominant species are forbs (<i>P. kansuensis</i> , <i>T. alpinum</i> , <i>A. tenuifolia</i> , <i>T. aipinumure</i> , <i>T. aipinumure</i> , <i>E. demsa</i> , <i>Ajuga lupulina</i> and so on). The cover of community is 50%~60%	
14	3943	33° 15.770' N 100° 27.828' E	植物群落由禾本科(垂穗披碱草、冷地早熟禾、洽草等)、莎草科(苔草、矮嵩草)、杂类草(鹅绒萎陵菜、青海凤毛菊、雅毛茛、甘肃马先蒿、细叶亚菊、银莲花、雪白萎陵菜等)植物组成. 群落盖度: 80%~90% The community is dominated by grasses (<i>E. nutans</i> , <i>P. cryrnophila</i> , <i>Koeleria cristata</i> and so on), sedges (<i>Carex atrofusca</i> , <i>Kobresia humilis</i>), forbs (<i>Potentilla anserine</i> , <i>Saussurea katochaete</i> , <i>Ranunculus pulchellus</i> , <i>P. kansuensis</i> , <i>A. tenuifolia</i> , <i>Anemone subpinata</i> , <i>P. nivea</i> and so on). Overall cover of 80%~90%	

cm), 过2 mm筛, 保存于4℃冰箱中, 用于微生物生物量、土壤酶活性的测定. 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, 风干后测定土壤有机质、全氮、速效氮、全磷和速效磷含量.

全磷采用钼锑抗比色法, 速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法, 全N和速效N采用凯氏法和康维皿法, 有机质含量采用丘林法测定. 微生物生物量碳的测定采用灭菌-提取法^[19]. 土壤脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶的测定采用比色法^[20]. 土壤容重用环刀法测定, 土壤含水量用烘干法测定. pH值采用电位法测定.

1.2.4 数据分析 生物多样性指数包括:

丰富度指数: $R=S$

群落多样性指数采用Shannon-Wiener指数:

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

均匀度指数采用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.

草地质量指数(IGQ, Index of grassland quality)为比较各建植期人工草地质量的优劣, 计算各建植期草地质量指数^[21]: $IGQ = -\sum_{i=1}^4 iS_i$

式中, i 为植物的适口性, 将植物按适口性划分为5类^[22]. 其中, 优良牧草为3, 中等牧草为2, 低下牧草为1, 劣质草为0, 毒杂草为-1. S_i 表示适口性为*i*的植物在群落中的相对盖度, S_{-1} 表示适口性为“毒杂草”的植物的盖度, S_0 表示适口性为“劣质草”的植物的盖度, S_1 、 S_2 、 S_3 分别为低下牧草、中等牧草、优良牧草的盖度. 试验数据均采用SPSS软件进行统计

分析.

2 结果与分析

2.1 不同建植期人工草地群落物种组成

不同建植期人工草地群落物种组成、物种数各不相同. 物种数在建植期4 a、5 a、7 a、9 a、14 a的人工草地中分别是7、6、6、9、20种, 且功能群组成和每种植物的相对重要值也不尽相同, 其中14 a人工草地群落中功能群数量、物种数最高(分别为3、20)(表2).

2.2 不同建植期人工草地植被数量特征变化

通过对群落数量特征的调查分析表明, 不同建植期人工草地植物群落的种类组成、植物功能群组成和群落数量特征存在显著差异(表3, 表4, 表5). 随着演替时间的推移, 人工草地群落盖度、高度、物种数、生物量和多样性指数均表现出“V”字型变化规律, 即建植5 a、7 a、9 a人工草地群落盖度的数量特征值减小. 不同建植期人工草地群落植物功能群组成及其比例显著不同, 4 a草地群落主要由禾本科和杂类草植物组成, 禾本科植物群落生物量占群落生物量的83.51%, 杂类草植物占16.49%; 5 a草地群落也是由禾本科和杂类草植物组成, 禾本科植物群落生物量明显减少, 只占群落生物量的65.96%, 杂类草植物占34.04%; 7 a草地群落仅由杂类草植物组成; 9 a草地群落由禾本科和杂类草植物组成, 禾本科植物群落生物量仅占群落生物量的4.08%, 杂类草植物占95.91%; 14 a草地群落组成明显发生了改变, 大量的禾本科、莎草科植物入侵, 其比例为48.71%、27.2%, 杂类草植物明显减少, 其比例则为24.1%.

不同建植期人工草地群落在演替过程中, 杂类草甘肃马先蒿的数量特征变化尤为明显在4 a的人工草地群落中分

表2 不同建植期人工草地群落物种的相对重要值
Table 2 Relative important values of differently aged artificial grasslands

功能群 Functional group	种名 Species	群落建植年龄 Different ages (t/a)				
		4	5	7	9	14
禾本科 Grasses	垂穗披碱草 <i>E. nutans</i>	42.65	30.89	—	13.16	18.56
	冷地早熟禾 <i>P. cryrnophila</i>	26.48	20.62	—	9.11	7.11
	星星草 <i>P. tenuiflora</i>	10.44	6.82	—	4.05	6.26
	洽草 <i>K. cristata</i>	—	—	—	—	9.33
	发草 <i>Deschampsia caespitosa</i>	—	—	—	—	7.62
莎草科 Sedges	苔草 <i>C. atrofusca</i>	—	—	—	—	17.61
	矮蒿草 <i>K. humilis</i>	—	—	—	—	3.54
杂类草 Forbs	甘肃马先蒿 <i>P. kansuensis</i>	12.25	36.14	26.85	16.71	4.55
	直立梗唐松草 <i>T. alpinum</i>	1.56	1.88	18.33	11.55	—
	细叶亚菊 <i>A. tenuifolia</i>	3.48	3.65	16.24	13.27	1.31
	高山唐松草 <i>T. aipinumlure</i>	3.14	—	10.27	9.57	0.43
	蜜花香薷 <i>E. densa</i>	—	—	15.76	12.14	—
	藏忍冬 <i>L. tibetica</i>	—	—	12.55	—	—
	白苞筋骨草 <i>A. lupulina</i>	—	—	—	10.44	—
	鹅绒萎陵菜 <i>P. anserina</i>	—	—	—	—	8.58
	青海凤毛菊 <i>S. katochaete</i>	—	—	—	—	6.42
	雅毛茛 <i>R. pulchellus</i>	—	—	—	—	5.24
	银莲花 <i>A. subpinata</i>	—	—	—	—	1.12
	雪白萎陵菜 <i>P. nivea</i>	—	—	—	—	0.84
	蒙古蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	—	—	—	—	0.56
	青藏棱子芹 <i>Pleurespermum pulszkyi</i>	—	—	—	—	0.38
	高山葶苈 <i>Draba alpina</i>	—	—	—	—	0.24
	尖叶龙胆 <i>Gentiana atistata</i>	—	—	—	—	0.16
	老灌草 <i>Geranium pylzowianum</i>	—	—	—	—	0.14
	种数 Species number		7	6	6	9

表3 不同建植期人工草地群落数量特征
Table 3 Quantitative characteristics of differently aged artificial grasslands ($\bar{x} \pm s$)

群落建植年龄 Different ages (t/a)	盖度 Coverage (P/%)	高度 Height (h/cm)	物种数 Species No.	地上生物量 Aboveground biomass ($\rho/g m^{-2}$)	地下生物量 Underground biomass ($\rho/g m^{-2}$)	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Pielou指数 Pielou's index
4	85±2.58 ^a	41.35 ^a	6.50±1.38 ^c	440.95±32.23 ^a	1296.92±63.92 ^a	2.2019 ^b	0.8583 ^b
5	77±3.41 ^b	34.52 ^b	6.26±0.24 ^c	296.35±21.22 ^b	1012.58±46.33 ^a	2.2203 ^b	0.8321 ^b
7	50±1.17 ^d	21.33 ^c	6.00±0.89 ^c	182.73±24.17 ^c	454.90±58.19 ^b	2.2117 ^b	0.8356 ^b
9	56±1.58 ^c	22.58 ^c	8.33±1.37 ^b	219.88±6.86 ^{bc}	505.06±40.49 ^b	2.2045 ^b	0.8426 ^b
14	80±2.35 ^b	35.37 ^b	19.67±1.63 ^a	255.01±22.55 ^b	1190.61±67.32 ^a	2.7292 ^a	0.9626 ^a

同列不同字母表示数据间差异显著 ($P < 0.05$)。下同 Different letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below

别为开始局部入侵,在5~6 a的人工草地群落中大面积入侵,其入侵速度、入侵面积达到高峰期,甘肃马先蒿基本替代了禾本科植物而成为群落优势种,其盖度、重要值和生物量(分别为55、36.14、76.90)显著高于其它建植期的对应值(表4),伴生种有细叶亚菊、蜜花香薷(*Ersholtzia densa*)、藏忍冬(*Lonicera tibetica*)等,人工草地的特征基本消失。这表明杂类草的侵入已相当严重,人工草地已严重退化。但随着演替过程的逐步深入,14 a人工草地群落中优良牧草(禾本科、莎草科)比例逐渐提高,物种数、生物量、多样性指数回升,群落趋于稳定(表5)。

2.3 不同建植期人工草地质量变化

由图1可知,随着人工草地建植年限的增加,草地质量指数呈现“V”字型变化趋势,即建植4 a、14 a人工草地质量指数最高,7 a人工草地质量指数最低。在演替过程中,随着多年生垂穗披碱草、冷地早熟禾和星星草地上生物量的下降,入侵杂草的地上生物量出现“高一低一高”的变化趋势,同时随着入侵杂草的种数逐渐增加,人工草地群落物种数、功能群数逐渐增加,优良牧草(如莎草科牧草、禾本科牧

草)的比例增大(表3,表5),草地质量指数也呈现出“高一低一高”的变化规律。

2.4 不同建植期人工草地土壤特征

土壤是植物生长的基质,其理化特性决定着植物群落类型的分布,同时植物群落又反作用于土壤,逐步改善其生境条件,使群落得以发展。不同建植期人工草地群落的土壤特征存在一定差异(表6)。土壤含水量、土壤容重等表征土壤结构状况和水源涵养功能的物理性质指标,在演替过程(建植7 a、9 a草地)中逐渐降低,到一定时期又逐步增加;同样土壤有机质、氮素和磷素等土壤主要的养分指标与土壤含水量、土壤容重的变化趋势相一致,说明人工草地在由于干扰而引起的退化演替过程中,大量毒杂草植物的入侵并不意味着草地完全退化和毫无放牧利用价值。因为大量杂类草的入侵和繁衍,植物种在群落中的适合度有所提高,特别是克隆植物通过强大的克隆繁殖功能,形成一些密集的匍匐茎网状结构,提高了植被覆盖度,减少了土壤水分的蒸发,这在一定程度上阻止了植物群落向盖度很低、容易沙化的极度退

表4 不同建植期人工草地群落甘肃马先蒿的数量特征
Table 4 Quantitative characteristics of *P. kansuensis* in differently aged artificial grasslands ($\bar{x} \pm s$)

群落建植年龄 Different ages (t/a)	盖度 Coverage (P/%)	重要值 Important value	生物量 Biomass ($\rho/g\ m^{-2}$)
4	24±1.11 ^c	12.25 ^c	23.19±2.22 ^c
5	55±2.43 ^a	36.14 ^a	76.90±4.15 ^a
7	31±3.01 ^b	26.85 ^b	38.94±1.69 ^b
9	20±2.06 ^c	16.71 ^c	19.55±1.07 ^c
14	4.5±0.26 ^d	4.55 ^d	0.86±0.13 ^d

表5 不同建植期人工草地群落植物功能群生物量的变化
Table 5 Change in plant functional group biomass of differently aged artificial grasslands ($\rho/g\ m^{-2}$) ($\bar{x} \pm s$)

群落建植年龄 Different ages (t/a)	禾本科 Grasses	莎草科 Sedges	杂类草 Forbs	群落生物量 Community biomass
4	368.22±19.23 ^a		72.73±6.35 ^d	440.95±32.23 ^a
5	195.48±11.08 ^b		100.87±6.22 ^c	296.35±21.22 ^b
7		182.73±24.17 ^b	182.73±24.17 ^d	182.73±24.17 ^d
9	8.96±2.21 ^c		210.88±7.46 ^a	219.88±6.86 ^c
14	124.21±16.76 ^b	69.36±16.31	61.44±8.83 ^c	255.01±22.55 ^b

化(“黑土滩”)阶段演替。

2.5 不同建植期人工草地土壤微生物生物量碳

土壤微生物生物量碳是土壤有机碳中活性最高的部分,其所占比例虽然较低,但对土壤有机碳的动态过程具有重要的影响。在同一土壤深度,不同建植期人工草地群落土壤微生物生物量碳存在明显差异(图2)。建植4 a草地0~10 cm土层土壤微生物生物量碳含量最高,其次为12 a草地和9 a草地,7 a草地含量最低;14 a草地10~20 cm土层土壤微生物生物量碳含量最高,7 a草地含量最低;20~40 cm土层生物量碳含量在14 a草地群落中最高,最低含量出现在4 a人工草地群落。不同建植期人工草地群落土壤剖面中,土壤微生物生物量碳含量随土层深度的增加而降低(图2)。这与4 a、14 a草地的根系较多而致密,7 a草地的群落物种组成和功能群组成单一、地下根系锐减(表2,表4)密切相关。

2.6 不同建植期人工草地土壤酶活性

土壤脲酶活性的高低在一定程度上反映了土壤供氮水平的状况,碱性磷酸酶活性的高低可以反映土壤速效磷的供应状况^[20]。不同建植期人工草地群落土壤脲酶活性和土壤碱性磷酸酶活性存在显著差异(图2)。建植4 a、14 a人工草地0~10 cm土层脲酶活性显著高于5 a、7 a和9 a人工草地;10~20 cm、20~40 cm土层脲酶活性变化趋势与0~10 cm变化基本一

表6 不同建植期人工草地群落的土壤理化性质

Table 6 Soil physico-chemical property (0~40 cm) of differently aged artificial grasslands ($\bar{x} \pm s$)

群落建植年龄 Different ages (t/a)	容重 Soil bulk density ($\rho/g\ cm^{-3}$)	土壤含水量 Soil moisture (w/%)	pH	土壤有机质 Soil organic matter (w/g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (w/g kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen (w/mg kg ⁻¹)	全磷 Total phosphor (w/g kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphor (w/mg kg ⁻¹)
4	1.34±0.111 ^b	20.14±0.44 ^b	7.76±0.04 ^a	105.63±5.78 ^a	2.22±0.23 ^a	19.28±1.56 ^a	0.81±0.20 ^a	4.85±0.29 ^a
5	1.55±0.12 ^a	11.27±0.18 ^d	6.45±0.03 ^b	82.28±10.43 ^b	1.93±0.17 ^b	16.91±1.46 ^a	0.61±0.10 ^b	4.19±0.54 ^a
7	1.53±0.06 ^a	10.41±0.42 ^d	6.528±0.01 ^b	75.22±3.86 ^c	1.34±0.11 ^c	10.50±0.79 ^b	0.60±0.11 ^b	2.87±0.19 ^b
9	1.51±0.11 ^a	13.81±1.03 ^c	6.50±0.02 ^b	65.11±3.77 ^d	1.16±0.10 ^c	9.70±1.18 ^b	0.52±0.10 ^b	2.90±0.42 ^b
14	1.17±0.06 ^c	26.07±1.18 ^a	6.36±0.02 ^b	84.84±5.87 ^b	1.88±0.11 ^b	18.27±1.10 ^a	0.61±0.11 ^b	4.80±0.64 ^a

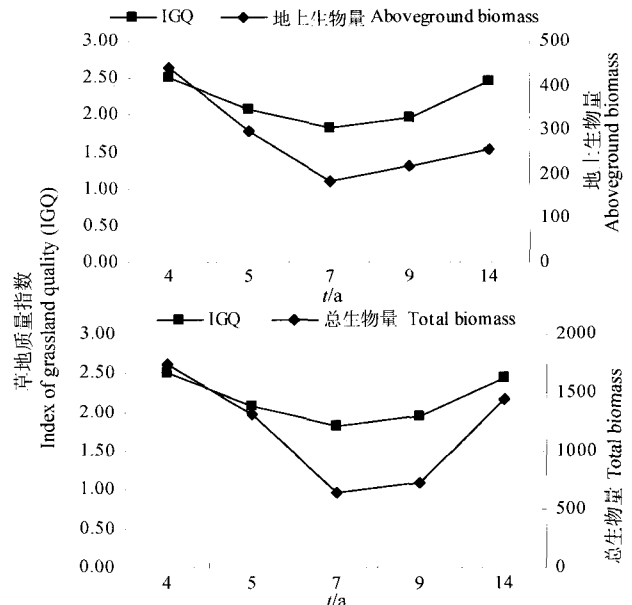


图1 不同建植期人工草地质量指数变化
Fig. 1 Dynamics of index of the quality of differently aged artificial grasslands

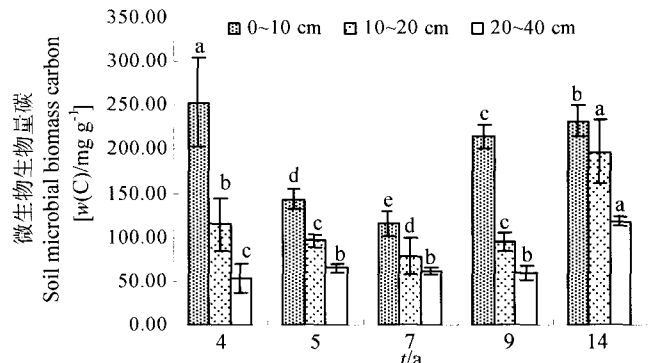


图2 不同建植期人工草地土壤微生物量碳变化
Fig. 2 Dynamics of soil microbial biomass carbon in differently aged artificial grasslands

致。建植4 a、14 a人工草地0~10 cm土层土壤碱性磷酸酶活性显著提高,5 a、7 a和9 a人工草地10~20 cm、20~40 cm土层碱性磷酸酶活性明显降低。不同建植期人工草地群落土壤剖面中土壤脲酶、碱性磷酸酶活性随土层深度的增加而降低(图3)。随着演替的进展,不同建植期人工草地的土壤酶活性明显呈“V”字型变化(图3)。与5 a、7 a和9 a人工草地相比,4 a、14 a人工草地群落土壤有机质、全氮和速效氮含量高,导致

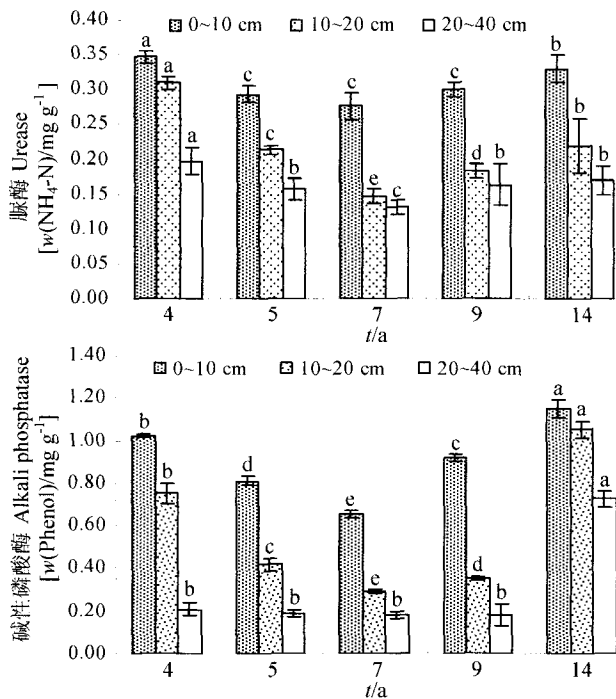


图3 不同建植期人工草地土壤酶活性变化

Fig. 3 Dynamics of soil enzyme activities in differently aged artificial grasslands

微生物活动旺盛,酶活性提高。

3 讨论

放牧作为一种典型的人为干扰,对草地生态系统的影响是多方面的。草地在放牧情况下,有2个演替方向,一是进展演替,二是退化演替^[23]。干扰增加植被斑块性和异质性,驱动着不同时间尺度上的植被动态^[24]。不同的放牧强度及持续时间不仅直接改变地表覆盖状况、草地的形态特征、生产力及草种结构,进而影响草地景观,还可以影响许多生态过程、养分循环及草地演替方式,从而决定着草地生态系统的发展方向、发育速度和产出功能^[25]。特别是对脆弱的高寒草甸生态系统,放牧干扰会引起草地植被发生演替,也会改变生态系统的结构和功能。本研究中,人工建植4 a的草地群落处于物种组成单一、生产力高而且比较稳定的阶段;但从人工建植5 a的草地开始,群落中入侵的杂类草比例是34.04%,尤其是甘肃马先蒿,其盖度、重要值和生物量在群落中均为最高,分别是55%、36.14和26%;7 a草地群落仅由杂类草植物组成,甘肃马先蒿的盖度、重要值和生物量分别是31%、26.85和21%;9 a草地群落中杂类草植物占95.91%,但甘肃马先蒿的盖度、重要值和生物量却明显降低,分别为20%、16.71和8%;14 a草地群落组成明显发生了改变,大量的禾本科、莎草科植物入侵,杂类草植物明显减少,其比例则为24.1%,其中甘肃马先蒿的盖度、重要值和生物量仅为4.5%、4.55和0.3%(表4,表5)。入侵杂类草的地上生物量、盖度和重要值随人工草地的演替进程,呈现出低—高一低—低的演变趋势,而草地质量则呈高一低—高的变化规律。

植物群落演替主要表现为不同物种的相互替代而导致

植物群落在组成结构和功能等方面发生变化。建植7 a后的人工草地由于其群落结构发生较大的变化,物种数下降,毒杂草比例增加,牧草品质和草地利用率大幅度下降,放牧干扰减小到了较低程度,可以使植物群落得到休养生息的机会,群落的微生境得以改善,使一些物种的幼苗成功更新和补充,与此同时也开始了人工草地植物群落的次生的、自然的恢复演替过程。当大量的杂类草入侵和繁衍后,植物种在群落中的适合度有所提高,特别是克隆植物通过强大的克隆繁殖功能,形成一些密集的匍匐茎网状结构,植被覆盖度有所提高,减少了土壤水分的蒸发,这在一定程度上阻止了植物群落逆向演替的发生。试验证明,退化草地的成功恢复,主要依赖种子和母株无性繁殖幼苗的有效建植^[26]。要改善草地群落结构,从种子到幼苗的更新补充是关键,草地群落经历外部干扰能够影响草地群落物种间的相互作用以及现有的空间格局发生变化而形成新的空间格局^[27]。高寒草甸在过渡的放牧压力下,部分种子被家畜和昆虫采食,导致种子源的减少,进而影响群落的种子幼苗更新和群落结构组成^[28]。

土壤作为植物环境的主要因子,其基本属性和特征必然影响群落演替方向、群落生物量(地上、地下生物量)和物种多样性。土壤微生物是土壤生态系统中养分来源的巨大原动力,在动植物残体的降解和转化、养分的释放和循环及改善土壤理化特征中起着重要作用,是土壤生物活性最敏感的指标之一^[29]。土壤微生物生物量碳作为土壤有机碳库中最活跃的部分,是土壤有机质和养分转化与循环的动力^[30]。在建植4 a、14 a人工草地的演替阶段,特别是4 a草地在建植初期,辅施增施肥料,尤其是氮肥,以改善土壤的营养状况,加之其群落不仅地上部分生产量大,为土壤微生物提供大量凋落物,而且植物地下根系发达,密集于土壤表层,根系的分泌物及植物残体更是微生物丰富的能源物质。植物群落演替过程,也是植物对土壤不断适应和改造的过程,土壤性质是植物演替的重要驱动力之一。在一定环境条件下,所覆盖的植被类型不同,土壤的理化性质有差异,反映了土壤特性除了与其成土母岩、气候和自然理化性质有密切关系外,植被的作用也不可忽视。植物群落对土壤发育的作用,一是通过改变群落水热环境直接影响土壤的发育条件,二是通过根系和枯枝落叶回归土壤而直接参与土壤的成土过程。在试验区尽管植被恢复演替进行得比较缓慢,但从土壤发展的角度看,仍属进展演替。所以,在退化高寒草甸的恢复过程中,若降低和有效控制外界的干扰(主要是放牧),在现有的气候条件下,植被有望得到恢复。

Reynolds等认为,2种微生物过程对植物群落结构和动态有着重要的影响,即在资源利用上微生物的生态位分异调节作用和植物与土壤群落间的反馈机制^[31]。就植物来说,需要不同的酶来吸收土壤中的养分,而土壤微生物正是这些酶的主要资源。土壤脲酶直接参与土壤中含氮有机化合物的转化,其活性强度常被用来表征土壤氮素的供应水平^[32]。随着人工草地群落的演替进程,其生产力(地上、地下生物量)水平逐渐提高,与土壤微生物生物量碳、脲酶和碱性磷酸酶活性变化相一致,表明人工草地群落生产力受到土壤酶活性影响和作用,酶活性的提高有利于土壤有机质、腐殖质的合

成,促进土壤碳、氮、磷等养分元素的转化.植物群落物种组成、各物种生物学特征的差异会影响到土壤中异养微生物群落的资源有效性,改变微生物群落的组成和功能;土壤微生物群落组成和功能的变化也能影响到资源的有效性.在不同的空间和时间尺度上,植物生产水平的高低影响着微生物群落的生物量和功能^[33-34].因此,土壤酶活性的高低不仅影响群落生产力(地上、地下生物量),也影响群落物种、功能群组成和植物多样性.

综上所述,对中、轻度退化草地进行围栏封育,使其自然恢复,不失为一种既经济又行之有效的恢复措施.若土壤理化性状恶化,仅靠自然恢复是比较缓慢的,需靠人工促进其恢复.如考虑补播物种植物根系活力和根系生长类型的结合,上繁草与下繁草的结合.围栏封育对退化草地的植被更新和恢复有重要作用,而合理的放牧可以考虑作为草地生态系统管理的必要措施,与围栏封育配合实施.适当施肥保证草地生态系统物质输入与输出间的平衡,补充合适的外源繁殖体来提高草地群落中的种子库来源,同时实施围栏封育工程,为退化草地恢复提供繁殖体与土壤环境,实现人工草地逐步向恢复(正向)演替进行.

References

- Niu SL (牛书丽), Jiang GM (蒋高明). Function of artificial grassland in restoration of degraded natural grassland and its research advance. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2004, **15** (9): 1662~1666
- Wang CT (王长庭), Cao GM (曹广民), Wang QL (王启兰), Shi JJ (施建军), Du YG (杜岩功), Long RJ (龙瑞军). Characteristics of artificial grassland plant communities with different establishment duration and their relationships with soil properties in the source region of three rivers in China. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2007, **18** (11): 2426~2431
- Bradshaw AD. Underlying principles of restoration. *Can J Fish Aquat Sci*, 1996, **53**: 3~9
- Gil-Sotres F, Trasar-Ceped C, Leirós MC, Seoane S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol & Biochem*, 2005, **37**: 877~887
- Gros R, Monrozier LJ, Bartoli F, Chotte JL, Faivre P. Relationships between soil physico-chemical properties and microbial activity along a restoration chronosequence of alpine grasslands following ski run construction. *Appl Soil Ecol*, 2004, **27**: 7~22
- Tabatabai T, Dick WA. Enzymes in soil. In: Burns RG, Dick RP eds. *Enzymes in the Environment*. New York, USA: Maecel Dekker, 2002. 567~596
- Jenkinson DS. The determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soils. In: Wilson JR Ed. *Advances in Nitrogen Cycling in Agriculture Ecosystem*. Wallingford, UK: CAB International, 1988. 368~386
- Jenkinson DS, Ladd JX. Microbial biomass in soils: Measurement and turnover. In: Paul EA, Ladd JX eds. *Soil Biochemistry*. New York, USA: Dekker, 1981, **5**: 414~472
- Roy S, Singh JS. Consequences of habitat heterogeneity for availability of nutrients in a dry tropical forest. *J Ecol*, 1994, **82**: 503~509
- Xu YC (徐阳春), Shen QR (沈其荣), Ran W (冉炜). Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2002, **39** (1): 89~96
- Bushchbacher R, Uhl C, Serrao EAS. Abandoned pastures in eastern Amazonia: II. Nutrient stocks in the soil and vegetation. *J Ecol*, 1988, **76**: 682~699
- Amador JA, Glucksman AM, Lyons JB, Gorres JH. Spatial distribution of soil phosphatase activity within a riparian forest. *Soil Sci*, 1997, **162**: 808~825
- Kourtev PS, Ehrenfeld JG, Haggblom M. Exotic plant species alter the microbial community structure and function in the soil. *Ecology*, 2002, **83**: 3152~3166
- Sinsabaugh RL, Carreiro MM, Repert DA. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss. *Biogeochemistry*, 2002, **60**: 1~24
- Garcia C, Hernandez. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biol & Biochem*, 1997, **29**: 171~177
- Boerner REJ, Decker KLM, Sutherland EK. Prescribed burning effects on soil enzyme activity in a southern Ohio hardwood forest: a landscape-scale analysis. *Soil Biol & Biochem*, 2000, **32**: 899~908
- Tscherko D, Rustemeier J, Richter A, Wanek W, Kandeler E. Functional diversity of the soil microflora in the primary succession across two glacier forelands in the Central Alps. *Eur J Soil Sci*, 2003, **54**: 685~696
- Wang CT (王长庭), Wang QJ (王启基), Long RJ (龙瑞军), Jing ZC (景增春), Shi HL (史慧兰). Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytoc Sin* (植物生态学报), 2004, **28** (2): 240~245
- Vance ED, Brooks PC, Jenkinson DS. An extraction method for measure soil microbial biomass C. *Soil Biol & Biochem*, 1987, **19**: 703~707
- Guan SY (关松荫). *Soil Enzyme and Research Methods*. Beijing, China (北京): China Agriculture Press, 1986. 182~266
- Zhang DY (张大勇), Wang G (王刚), Du GZ (杜国祯). The succession of artificial grassland in Gannan mountain steppe. *Acta Phytocol Geobot Sin* (植物生态学与地植物学学报), 1990, **14** (2): 103~109
- Wu YH (吴玉虎), Mei LJ (梅丽娟). *Plant Resources and Its Environment in the Source Region of Yellow River*. Xining, China (西宁): Qinghai People Press, 2001
- Ren JZ (任继周). *Research Methods of Pratacultural Science*. Beijing, China (北京): China Agriculture Press, 1998. 1~29
- McIntyre S, Lavorel S, Tremont RM. Plant life-history attributes: Their relationship to disturbance response in herbaceous vegetation. *J Ecol*, 1995, **83**: 31~34
- Li YQ (李玉强), Zhao HL (赵哈林), Zhao XY (赵学勇), Zhang TH (张铜会), Chen YP (陈银萍). Soil respiration, carbon balance and carbon storage of sandy grassland under post-grazing natural restoration. *Acta Pratacul Sin* (草业学报), 2006, **15** (5): 25~31
- Zhang R (张荣), Chen YM (陈亚明), Sun GJ (孙国钧), Li FM (李凤民). The role of diaspores and microsites in restoring degraded grasslands. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, **24** (5): 972~977

- 27 Liu ZG (刘振国), Li ZQ (李镇清). Fine-scale spatial pattern of *Artemisia frigida* population under different grazing intensities. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2004, **24** (2): 227-234
- 28 Howe HF, Zorn AB, Sullivan A. Massive and distinctive effects of meadow voles on grassland vegetation. *Ecology*, 2006, **87** (12): 3007-3013
- 29 Hu HB (胡海波), Zhang JC (张金池), Gao ZH (高智慧), Chen SW (陈顺伟), Zang TL (藏廷亮). Study on quantitative distribution of soil microorganism and relationship with enzyme activity and physical, chemical property of shelter-forest in rocky coastal area. *For Res* (林业科学研究), 2002, **15** (1): 88-95
- 30 Cao H (曹慧), Sun H (孙辉), Yang H (杨浩), Sun B (孙波), Zhao QG (赵其国). A review: Soil enzyme activity and its indication for soil quality. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2003, **9** (1): 105-109
- 31 Reynolds HL, Packer A, Bever JD, Clay K. Grassroots ecology: Plant-microbe-soil interactions as drivers of plant community structure and dynamics. *Ecology*, 2003, **84**: 2281-2291
- 32 Long J (龙健), Huang CY (黄昌勇), Teng Y (滕应), Yao HY (姚槐应). Microbial eco-characteristics of reclaimed mining wasteland in red soil area of Southern China I. Effects on soil microbial activity. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, **14** (11): 1925-1928
- 33 Zak DR, Grigal DF, Gleeson S, Tilman D. Carbon and nitrogen cycling during secondary succession: Constraints on plant and microbial biomass. *Biogeochemistry*, 1990, **11**: 111-129
- 34 Zak DR, Tilman D, Parmenter CW. Plant production and soil microorganisms in late-successional ecosystems: A continental-scale study. *Ecology*, 1994, **75**: 2333-2347

中国生物入侵研究(中、英版)

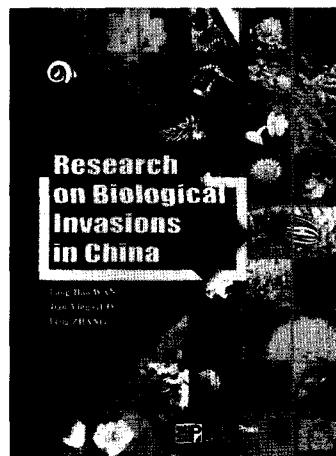
万方浩 郭建英 张峰 等著 科学出版社 出版(2009年10月)

中文版 978-7-03-025800-7 ¥150.00

英文版 978-7-03-025799-4 ¥180.00

内容简介

本书共分为九章,第一章主要分析了中国外来有害生物入侵现状、发生与发展趋势;第二章重点介绍了中国最具危害性与威胁性的20个农林入侵物种的分布与危害以及核心研究问题;第三章在因子分析及典范对应分析的基础上,深入剖析了外来有害生物成功入侵的因素;第四章应用不同的分析模式,评估了生物入侵对经济、生态与社会的影响;第五章重点构架与解析了中国生物入侵基础与应用研究的体系与模式,提出在基础理论研究方面需要重点关注的科学问题,简要介绍了现阶段基础与应用研究的主题项目及代表前沿性研究的核心成果与突出亮点;第六章以典型农林入侵物种(病虫害)为对象,系统地归纳与总结了其入侵机制、扩张与暴发的生态学过程、与本地种的竞争与互作的关系以及对生态系统产生的影响等;第七章从预防预警、检测监测、应急处理、持续防控的技术与方法的角度,系统性总结了生物入侵防控技术的研究与发展;第八章从管理到研究等不同层面,提出了一些应对生物入侵的建议;第九章有针对性地提出了基础理论与防控技术的创新需求。



本书共分为九章,第一章主要分析了中国外来有害生物入侵现状、发生与发展趋势;第二章重点介绍了中国最具危害性与威胁性的20个农林入侵物种的分布与危害以及核心研究问题;第三章在因子分析及典范对应分析的基础上,深入剖析了外来有害生物成功入侵的因素;第四章应用不同的分析模式,评估了生物入侵对经济、生态与社会的影响;第五章重点构架与解析了中国生物入侵基础与应用研究的体系与模式,提出在基础理论研究方面需要重点关注的科学问题,简要介绍了现阶段基础与应用研究的主题项目及代表前沿性研究的核心成果与突出亮点;第六章以典型农林入侵物种(病虫害)为对象,系统地归纳与总结了其入侵机制、扩张与暴发的生态学过程、与本地种的竞争与互作的关系以及对生态系统产生的影响等;第七章从预防预警、检测监测、应急处理、持续防控的技术与方法的角度,系统性总结了生物入侵防控技术的研究与发展;第八章从管理到研究等不同层面,提出了一些应对生物入侵的建议;第九章有针对性地提出了基础理论与防控技术的创新需求。

邮购地址: 北京东黄城根北街16号 科学出版社 科学出版中心 生命科学分社 邮编: 100717

联系人: 李韶文(010-64000849) 周文宇(010-64031535) 网址: <http://www.lifescience.com.cn>