

江河源区人工草地植物群落和土壤酶活性变化*

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 810008)

(²兰州大学青藏高原生态系统管理国际中心 兰州 730020)

摘要 通过研究江河源区不同建植年限人工草地植物群落特征、土壤理化性状和6种土壤酶活性,分析人工草地建植年限与土壤酶活性的关系。结果表明:随着人工草地建植年限的增加,植物群落的数量特征多呈高一低一高、杂类草生物量低一高一低、莎草生物量增加的趋势;土壤养分变化为高一低一高、容重为低一高一低、pH下降的趋势;土壤脲酶、转化酶、纤维素酶、碱性磷酸酶活性均呈高一低一高的变化趋势,蛋白酶活性呈逐渐上升而多酚氧化酶活性呈逐年下降的趋势。人工草地不同建植年限之间,6种土壤酶的活性显示出明显的差异性。逐步回归分析表明:土壤酶活性与植物群落的数量特征、土壤理化因子之间存在不同程度的相关关系。植物的物种数、高度、地下生物量及土壤湿度对大多水解酶类表现出直接的正效应,容重和pH对所选的多数酶活性显示出直接的负效应。各种环境因子之间相互调节,通过直接或间接的方式控制着土壤酶活性的大小。表5 参34

关键词 江河源区;人工草地;土壤酶活性;植物群落;土壤理化性状;逐步回归分析

CLC Q948.1 (244)

Changes in Plant Communities and Soil Enzyme Activities of Artificial Grasslands in Headwater Areas of the Yangtze and Yellow Rivers*

WANG Qilan^{1**}, WANG Changting¹, LIU Wei¹, CAO Guangmin¹ & LONG Ruijun²

(¹Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

(²International Centre for Tibetan Plateau Ecosystem Management, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract The changes in plant communities and soil enzyme activities of artificial grasslands with different cultivation ages were investigated in the headwater areas of the Yangtze and Yellow rivers in China. With the increase in cultivation ages, the abundance of most plant communities and soil nutrients changed in a high - low - high pattern, i.e., “V” pattern, while the forb biomass and soil bulk density in an adverse pattern. The sedge biomass increased gradually, but soil pH presented a decreasing trend. All enzyme activities presented obvious differences among the grasslands with different cultivation ages. The activities of urease, invertase, cellulase and alkaline phosphatase changed in a “V” pattern. The protease activity ascended, while polyphenol oxidase activity descended with ageing. Stepwise regression analysis indicated the correlations at different degrees between enzyme activities and plant community and soil properties. The species number, plant height, underground biomass and soil moisture have direct positive-effect on the activities of most hydrolase, while bulk density and pH have direct negative-effect on the activities of most selected enzymes. All soil enzymes were regulated by environmental factors in direct or indirect paths. Tab 5, Ref 34

Keywords headwater area of the Yangtze and Yellow River; artificial grassland; soil enzyme activity; plant community; physicochemical characters of soil; stepwise regression analysis

CLC Q948.1 (244)

由于全球气候暖干化和长期的超载过牧,自上世纪90年代,江河源区的高寒草甸严重退化,“黑土型”退化草地已成为该区的主要生态问题^[1]。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,草地生态系统的恢复和重建已受到广泛关注^[2-3]。退化生态系统的恢复,首先是植被恢复,植被恢复能充分利用土壤-植物复合系统的功能改善局部生态环境,促进生物物种多样性的形成^[4],同时

使草地本身的土壤结构及其理化性质得以恢复^[5],进而对区域和全球的生态平衡有所贡献。大量试验研究表明,建植人工植被是恢复极度退化高寒草甸生产、生态功能的快速和有效途径之一^[6],同时在地处青藏高原的高寒草地退化生态系统中,人工草地建植具有创造高的生产力和改善草地生态环境的双重功能^[7-8]。近年来,江河源区通过建植多年生混播人工草地,不仅阻止了土壤环境的进一步恶化,还在一定程度上缓解了该区的放牧压力^[9]。对于多年生人工草地的建设,选择适当的评价指标对其可持续利用具有重要的理论意义和实践价值。

良好的土壤生态的形成是土壤自身质量与整个生态环境质量共同提高的结果,两者相互依存互为促进^[10]。土壤是由生物和非生物组成的复杂综合体,肥力是土壤的本质和属

收稿日期: 2009-11-05 接受日期: 2009-11-24

*国家自然科学基金重点项目 (No. 30730069) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. KSCX2-YW-Z-1020) Supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 30730069) and the Important Direction Project of the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (No. KSCX2-YW-Z-1020)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wql@nwipb.ac.cn)

性. 土壤酶作为表征土壤肥力的一个重要指标, 直接参与土壤物质转化和能量转化过程^[11-12]. 土壤酶通过对进入土壤的多种有机物质和有机残体的生命化学转化, 使生态系统的各组分间有了功能上的联系^[13-14], 从而保持了土壤生物化学的相对稳定状态和土壤生态系统的相对稳定性. 几乎所有土壤生态系统的退化与恢复都伴随着土壤酶活性的变化^[15-16]. 本文通过研究江河源区不同建植年限人工草地土壤理化性状和酶活性变化, 分析人工草地建植对退化高寒草甸土壤质量的影响, 以期揭示植物群落—土壤肥力—土壤酶活性三者之间的相互关系, 旨在为江河源区人工草地资源的合理利用和退化高寒草地土壤质量的改善提供可靠的依据.

1 材料与方法

1.1 样地选择与野外调查

在位于江河源区的青海省果洛州玛沁县(34°22'~34°28' N, 100°12'~100°30' E, 海拔3 739~3 751 m)和达日县(33°16'~33°34' N, 99°54'~100°28' E, 海拔3 946~4 086 m), 选择建植期分别为4、7、9、14 a的多年生人工草地为试验样地. 土壤为高山草甸土, 土层薄, 约30~40 cm以下为砾石. 各样地面积均为50 m×50 m. 所选样地是以嵩草属(*Kobresia*)植物为建群种的植被严重退化后经翻耕施肥, 条播了垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa cryrnophila*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)和星星草(*Puccinellia tenuiflora*)的混播人工草地. 在人工草地建植的前3年进行灭杂、施肥等人为维护, 其中播种前施入底肥——磷酸氢二铵, 施肥量为150 kg/hm², 第3年7月底施入追肥——尿素, 施肥量为150 kg/hm².

2005年8月中下旬在上述4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^[17], 采集植物地下根系(0~40 cm), 清水冲洗干净后烘干称量.

1.2 测定方法

2005年8月在25 cm×25 cm样方中, 采集植物地下根系的

同时, 用土壤剖面法采集土壤样品(0~40 cm), 过2 mm筛, 保存于4 °C冰箱中, 用于土壤酶活性的测定^[11], 以“S”形取样法用土钻在样地内选10个样点, 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^[18]. 用环刀法测定土壤容重.

1.3 数据分析

采用DPS 7.0和SPSS 13.0进行分析.

2 结果与分析

2.1 人工草地的植被及土壤理化特征

从表1可见, 在人工草地建植的初期, 由于人为维护和施肥措施, 群落的盖度、地上/地下生物量及禾草类生物量明显增加, 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, 未发现莎草科物种生长, 与禾草类生物量相比, 杂类草生物量很低. 在人工草地建植的第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, 禾草类消失, 杂类草生物量明显升高. 与第7年相比, 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, 禾草又出现, 但其生物量很低. 在人工草地建植的第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.

从表2可见, 从人工草地建植的第4~14年, 土壤容重呈“Λ”型变化, 土壤湿度、有机质、全氮、有效氮、全磷、有效磷呈“V”型变化, 土壤pH呈下降的趋势, 不同年限之间上述指标的差异程度不同.

2.2 人工草地土壤酶活性的变化动态

由表3可见, 脲酶、转化酶、纤维素酶、碱性磷酸酶活性均呈“V”型变化, 其中脲酶、转化酶、纤维素酶均以第9年最低, 碱性磷酸酶以第7年最低, 以上酶活性均以第14年最高, 不同建植期之间酶活性存在显著的差异($P<0.05$). 蛋白酶活性随着人工草地建植年限的增加而逐渐升高, 与之相反, 多酚氧化酶呈逐年降低的趋势, 这两种酶活性在不同建植年

表1 不同建植年限人工草地植被的数量特征($\bar{x}\pm s$, $N=10$)

Table 1 Quantitative characteristics of artificial grasslands cultivated in different periods ($\bar{x}\pm s$, $N=10$)

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

同一栏中不同字母表示处理间在0.05水平上差异显著. 下同

Mean values followed by different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$). The same below

表2 不同建植年限人工草地的土壤理化特征($\bar{x}\pm s$, $N=10$)

Table 2 Soil physicochemical properties (0~40 cm) of artificial grasslands cultivated in different periods ($\bar{x}\pm s$, $N=10$)

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

表3 不同建植年限人工草地的土壤酶活性变化动态 ($\bar{x} \pm s$, $N=10$)
Table 3 Activities of soil enzymes (0~40 cm) of artificial grasslands cultivated in different periods ($\bar{x} \pm s$, $N=10$)

建植年限 Community age (t/a)	脲酶 Urease ($\text{NH}_4\text{-N}$, w/mg g^{-1})	蛋白酶 Protease (Try, w/mg g^{-1})	多酚氧化酶 Polyphenol oxidase (Purpurogallin, w/mg g^{-1})	蔗糖酶 Invertase (Glucose, w/mg g^{-1})	纤维素酶 Cellulase (Glucose, w/mg g^{-1})	碱性磷酸酶 Alkali phosphatase (Phenol, w/mg g^{-1})
4	0.22±0.00 c	0.80±0.01 a	0.45±0.01 c	0.79±0.02 b	19.22±0.07 c	0.31±0.00 b
7	0.19±0.01 b	0.90±0.01 b	0.42±0.02 c	0.38±0.01 a	17.51±0.43 b	0.25±0.00 a
9	0.18±0.01 a	0.92±0.01 c	0.38±0.02 b	0.37±0.00 a	15.97±0.31 a	0.47±0.00 c
14	0.28±0.00 d	1.21±0.00 d	0.27±0.00 a	1.01±0.02 c	20.56±0.03 d	0.98±0.00 d

表4 土壤酶活性与植物群落特征之间的相关关系
Table 4 Correlativity between activities of soil enzymes and plant community traits

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
X_1	0.5293*	0.0591	-0.2458	0.8545**	0.4084	0.4003
X_2	0.4072	-0.0983	-0.1282	0.7729**	0.2681	0.2581
X_3	0.9179**	0.9751**	-0.9375**	0.6648**	0.9675**	0.9719**
X_4	-0.1530	-0.6187*	0.4453	0.321	-0.2968	-0.3078
X_5	0.5711*	0.0994	-0.2927	0.8871**	0.4532	0.4425

** $P<0.01$, * $P<0.05$. 下同 The same below

限之间呈不同程度的差异性 ($P<0.05$).

2.3 土壤酶活性与植物群落特征之间的关系

以群落特征为自变量 $X_i = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\} = \{\text{盖度, 高度, 物种数, 地上生物量, 地下生物量}\}$, 土壤酶活性为因变量 $Y_i = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6\} = \{\text{脲酶, 蛋白酶, 多酚氧化酶, 蔗糖酶, 纤维素酶, 碱性磷酸酶}\}$, 进行逐步回归分析.

由表4可见, 植物群落的盖度与脲酶和蔗糖酶活性呈显著的正相关, 高度只与蔗糖酶活性显著正相关, 物种数除与多酚氧化酶活性显著负相关外, 与其它5种酶活性呈现出显著的正相关关系, 地上生物量只与蛋白酶活性显著负相关, 地下生物量与脲酶、蔗糖酶活性存在显著的正相关关系.

直接途径系数 ($P_{i \rightarrow y}$) 表明, 植被盖度和地上生物量分别对脲酶、蛋白酶、蔗糖酶、纤维素酶和碱性磷酸酶活性表现为直接的抑制效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-0.230 2和-0.430 7、-0.297 7和-0.437 3、-0.146 0和-0.033 4、-0.323 0和-0.412 2、-0.248 6和-0.413 9, 而对多酚氧化酶活性表现为直接的促进效应, $P_{i \rightarrow y}$ 分别为0.317 4和1.077 1. 与之相反, 物种数和地下生物量分别对脲酶、蛋白酶、蔗糖酶、纤维素酶和碱性磷酸酶活性表现出直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为0.587 8和0.613 9、0.703 9和0.544 6、0.466 6和0.789 7、0.645 1和0.759 6、0.658 3和0.649 6, 对多酚氧化酶活性有明显的直接抑制效应, $P_{i \rightarrow y}$ 分别为-0.323 0和-0.517 9. 植物高度对脲酶、蔗糖酶、纤维素酶、碱性磷酸酶活性表现为明显的直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为0.346 4、0.149 9、0.136 3、0.161 6, 而对蛋白酶和多酚氧化酶活性表现为明显的直接抑制效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-0.032 9、-0.788 9.

间接途径系数 ($P_{i \rightarrow j \rightarrow y}$) 表明, 群落的盖度通过影响地上生物量, 间接抑制了水解酶类活性, 通过影响高度、物种数和地下生物量间接促进了多酚氧化酶活性; 群落的高度、物种数、地下生物量通过影响植被的盖度和地上生物量, 间接抑制了大多数水解酶类的活性, 促进了多酚氧化酶的活性; 地上生物量通过影响盖度和物种数间接抑制了水解酶类的活性, 通过影响高度间接促进了多酚氧化酶的活性.

2.4 土壤酶活性与土壤因子之间的相关关系

以土壤因子为自变量 $Z_i = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7,$

$Z_8\} = \{\text{容重, 湿度, pH, 有机质, 全氮, 有效氮, 全磷, 有效磷}\}$, 土壤酶活性为因变量 Y_i 进行逐步回归分析.

由表5可见, 容重、湿度与所测的6种土壤酶活性均存在显著的相关关系, pH与蛋白酶、多酚氧化酶、纤维素酶和碱性磷酸酶活性显著相关, 有机质、全氮只与蔗糖酶呈现出显著的相关关系, 有效氮与脲酶、蔗糖酶活性显著相关, 有效磷与脲酶、蔗糖酶、纤维素酶和碱性磷酸酶显示出明显的相关关系, 全磷与所测酶类活性均无显著的相关性.

直接途径系数 ($P_{i \rightarrow y}$) 表明, 容重对蛋白酶、多酚氧化酶、蔗糖酶、纤维素酶及碱性磷酸酶活性均表现出直接的负效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-0.074 0、-0.787 8、-0.227 1、-0.202 5、-0.102 6. 湿度对蛋白酶、纤维素酶和碱性磷酸酶活性表现为直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为1.497 2、0.621 3、0.860 7, 对多酚氧化酶、蔗糖酶活性表现为直接负效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-4.438 4、-0.525 6. pH对所测的6种酶活性均显示出明显的抑制效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-0.116 4 (Y_1)、-0.021 5 (Y_2)、-0.587 3 (Y_3)、-0.190 0 (Y_4)、-0.151 8 (Y_5)、-0.092 4 (Y_6). 有机质对脲酶、蛋白酶、纤维素酶、碱性磷酸酶呈现出直接负效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-0.239 9、-1.161 1、-0.464 0、-0.642 5, 对蔗糖酶表现为直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 为0.564 6. 全氮对脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶、纤维素酶表现为直接负效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-1.189 3、-4.264 9、-2.237 2、-0.054 0, 对蛋白酶、碱性磷酸酶表现为直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为1.336 0、0.400 7. 有效氮对蛋白酶和碱性磷酸酶表现为直接负效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-1.514 3、-0.357 3, 对脲酶、多酚氧化酶、蔗糖酶表现为直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为1.898 3、6.121 2、2.787 6. 全磷仅对脲酶显示出明显的直接负效应 ($P_{i \rightarrow y} = -0.114 3$), 对蛋白酶、多酚氧化酶、蔗糖酶、纤维素酶、碱性磷酸酶均显示出直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为0.091 8、1.126 6、0.225 6、0.199 2、0.091 5. 有效磷对脲酶、蔗糖酶表现为直接负效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为-0.194 7、-0.462 0, 对蛋白酶、碱性磷酸酶表现为直接正效应, $P_{i \rightarrow y}$ 依次为0.163 0、0.063 9.

间接途径系数表明, pH、有机质、全氮、全磷、有效磷通过促进有效氮的形成, 影响了其余土壤因子的变化, 从而

表5 土壤酶活性与土壤因子之间的相关性分析
Table 5 Correlation analysis between activities of soil enzymes and soil factors

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
Z_1	-0.881**	-0.6260*	0.7281**	-0.8836**	-0.8254**	-0.8114**
Z_2	0.9192**	0.665**	-0.7565**	0.9751**	0.8859**	0.8824**
Z_3	-0.4823	-0.8104**	0.6682**	-0.0453	-0.5893*	-0.5981*
Z_4	0.1756	-0.3018	0.1254	0.6209*	0.0549	0.0458
Z_5	0.3719	-0.0890	-0.0711	0.7652**	0.2656	0.2575
Z_6	0.5709*	0.1350	-0.2885	0.889**	0.4757	0.4685
Z_7	-0.0468	-0.3630	0.2819	0.3731	-0.1007	-0.1006
Z_8	0.6178*	0.2282	-0.3743	0.8871**	0.5408*	0.5366*

间接抑制了脲酶的活性; 土壤湿度、全氮、全磷、有效磷通过相互之间的调节, 改善了土壤容重及pH, 间接促进了蛋白酶活性; 而容重、pH、有机质和有效氮之间通过互相控制, 使其它土壤因子受到影响, 从而使蛋白酶活性受到抑制。容重和pH通过互相调节, 间接抑制了多酚氧化酶活性; 其余土壤因子通过控制湿度、pH、全氮, 调节了有效氮、全磷的代谢周转, 间接影响了多酚氧化酶的活性。湿度、pH、全氮和速效磷通过促进全氮积累, 控制有机质、有效氮、有效磷的周转, 间接促进了蔗糖酶的活性, 有机质和速效氮通过相互调节间接抑制了蔗糖酶的活性。湿度和全氮通过调节容重、pH间接促进了纤维素酶的活性, 而容重、pH、有机质通过相互控制抑制了纤维素酶的活性。pH、全氮和速效磷通过促进有机质、速效氮代谢, 控制全氮间接抑制了碱性磷酸酶的活性, 而容重、湿度、有机质和速效氮通过相互调节间接促进了碱性磷酸酶的活性。

3 讨论

长期以来, 土壤有机质一直被作为表征土壤质量的一个综合指标, 但有机质的变化比较缓慢, 难以反映土壤短期的微小变化。土壤酶作为土壤的主要组成部分, 其活性与土壤理化性状具有密切的关联性, 土地利用方式和管理措施的改变能很快通过土壤酶活性的变化反映出来。Monreal (2000) 认为用包含几个酶活性的生物因子可以表征土地利用对土壤有机质的氧化及对碳氮磷养分的矿化作用^[9]。

在“黑土滩”型退化草地上, 通过人工措施建立多年生人工草地, 短期内可恢复植被, 并具有一定生产力^[2, 20]。本研究在人工草地建植初期, 虽生物量较高, 但随着利用年限的增加, 由于邻近天然草地的影响和各种种子的入侵, 人工草地逐渐向天然草地演替^[7], 历经了初期以禾草为优势种的简单群落—中期以杂类草为主的次生退化群落—后期禾草及莎草开始生长的恢复演替群落。植物的生长可以改善土壤环境^[4, 21], 在第9年以后, 随着甘肃马先蒿等其它物种的入侵, 地表出现苔藓结皮, 禾草开始生长。可能是地表结皮影响了水分的入渗, 土壤水分的再分配又直接影响种子库中种子的萌发^[22], 使土壤微环境得以有效的改善, 为地带性植被——嵩草属植物的入侵创造适宜的环境条件。在第14年, 群落的盖度、物种数等明显升高, 嵩草植物开始出现, 杂类草明显减少, 群落呈现为正向演替的恢复状态(表1), 实现了人工草地向天然草地的过渡^[23]。

土壤是一切生物生长发育的基质, 土壤理化性状的改变是植被演替的主要驱动力。由表2可以看出, 土壤环境的有机

质、有效养分等数量特征与植物群落的变化相一致。说明土壤环境的改变又影响了种子萌发、外来物种的定居、种间竞争及物种更替, 促进了植物群落的演替^[24], 另一方面土壤会随着人工草地的建植和群落的演替其理化性状发生改变^[25]。

土壤酶类是土壤中具有生物活性的蛋白质, 它们与土壤微生物一起推动着土壤的物质转化过程。土壤酶在酶促土壤有机物质转化中不仅显示专性特性, 同时也存在共性关系。酶的专性能反映土壤中与某类酶相关的有机化合物转化进程, 而有共性关系酶的总体活性在一定程度上反映土壤肥力水平高低^[11, 26]。由表3可见, 脲酶、转化酶、纤维素酶、碱性磷酸酶活性的变化动态与植物的数量特征、土壤养分的变化相一致, 蛋白酶活性随着人工草地建植年限的增加而增大, 说明植物的生长使土壤含氮有机物得以积累, 酶作用的底物的增加有力激发了水解酶类的活性^[14, 27]。多酚氧化酶能促进土壤有机碳的累积过程和土壤腐殖质合成^[16, 27], 本研究中多酚氧化酶呈逐年降低的趋势, 这与蒲小鹏(2008)的研究结果^[28]相一致。许多研究表明, 土壤多酚氧化酶活性与土壤腐殖质的腐殖化程度呈负相关, 说明多酚氧化酶活性在土壤养分含量低的情况下才激活^[29]。相关分析的结果也证实了这一点, 物种数、盖度、地下生物量等与水解酶类大多呈现出不同程度的正相关关系, 而与多酚氧化酶呈负相关关系(表4), 土壤湿度及速效养分大多与水解酶类显示出不同程度的正相关关系, 而与多酚氧化酶活性显示出不同程度的负相关(表5)。

土壤酶的分泌、酶活性大小与植被的生长状况、土壤中多糖、N素、P素的转化过程关系密切并相互影响^[30-32]。从通径分析结果看出, 植物和土壤的各个理化性状对土壤酶活性均存在的直接和间接的作用, 并且各性状之间互相调节, 共同维持土壤生态系统的物质循环和能量流动^[33, 34]。

References

- Li Y (黎与). Human, natural factors and formative mechanism formed “black soil patch” in Qinghai Sanjiangyuan Area. *Pratacult & Anim Husbandry* (草业与畜牧), 2007, 4: 30-32
- Wang QJ (王启基), Shi HL (史惠兰), Jing ZC (景增春), Wang CT (王长庭), Wang FG (王发刚). Recovery and benefit analysis of ecology on degraded natural grassland of the source region of Yangze and Yellow rivers. *Pratacult Sci* (草业科学), 2004, 21 (12): 35-41
- Zhang YL (张懿翎), Ding MJ (丁明军), Zhang W (张玮), Liu LS (刘林山), Wang ZF (王兆锋), Yan JZ (阎建忠), Bai WQ (摆万奇), Zheng D (郑度). Spatial characteristic of vegetation change in the source regions of the Yangtze River, Yellow River and Lancang River in China. *Geogr Res* (地理研究), 2007, 26 (3): 500-507

- 4 Wang W (王炜), Liu ZL (刘钟龄), Hao DY (郝敦元), Liang CZ (梁存柱). Research on the restoring succession of the degenerated grassland in Inner Mongolia I. Basic characteristics and driving force for restoration of the degenerated grassland. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 1996, **20** (5): 449~459
- 5 Ouyang KH (欧阳克蕙), Wang K (王堃). Effects of artificial grassland reconstruction on soil nutrients and enzyme activity in degraded red soil. *Acta Agric Univ Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2007, **29** (3): 474~478
- 6 Ma YS (马玉寿), Lang BN (郎百宁), Li QY (李青云), Shi JJ (施建军), Dong QM (董全民). Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow River Source Region. *Pratacult Sci* (草业科学), 2002, **19** (9): 1~5
- 7 Wang G (王刚), Jiang WL (蒋文兰). Study on the Population Ecology in Artificial Pasture. Lanzhou, China: Gansu Science and Technology Press (兰州: 甘肃科技出版社), 1998
- 8 Dong SK (董世魁), Hu ZZ (胡自治). Research advancement on the stability of artificial grassland and the mechanisms of its maintenance. *Grassl & Turf* (草原与草坪), 2000 (3): 3~8
- 9 Ma YS (马玉寿), Shang ZH (尚占环), Shi JJ (施建军), Dong QM (董全民), Long RJ (龙瑞军). Studies on allocate skills of artificial community of "black soil type" degraded grassland in the Yellow River source region. *Acta Agric Bor-occid Sin* (西北农业学报), 2007, **16** (5): 1~6
- 10 Fu BJ, Chen LD, Ma KM. The effect of land use change on the regional environmental in the Yangjuangou Catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geogr Sin* (地理学报), 1999, **54** (3): 241~246
- 11 Guan SY (关松荫). Soil Enzyme and Its Research Methods. Beijing: Chinese Agricultural Press (北京: 中国农业出版社), 1987
- 12 Aon MA, Colaneri AC. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physical-chemical properties in an agricultural soil. *Appl Soil Ecol*, 2001, **18**: 255~270
- 13 Yao SR (姚胜蕊), Shu HR (束怀瑞). Study on the effect of organic materials on mineral nutrients and enzymes in the rhizosphere of apple seedlings. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1999, **36** (3): 428~432
- 14 Acosta-martinez V, Cruz L, Sotomayor-ramirez D, Perez-alegria L. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Appl Soil Ecol*, 2007, **35**: 35~45
- 15 Bastida F, Moreno JL, Hernández T, Garcla C. Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation. *Soil Biol & Biochem*, 2006, **38**: 2503~2507
- 16 An SS, Huang YM, Zheng FL. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China. *Appl Soil Ecol*, 2009, **41**: 286~292
- 17 Wang CT (王长庭), Wang QJ (王启基), Long RJ (龙瑞军), Jing ZC (景增春), Shi HL (史惠兰). Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2004, **28** (2): 240~245
- 18 Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (中国科学院南京土壤研究所). Analysis of Soil Physical Chemical Feature. Shanghai, China: Shanghai Science and Technology Press (上海: 上海科技出版社), 1983
- 19 Monreal CM, Bergstlom DW. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical quality. *Can J Soil Sci*, 2000, **80**: 419~428
- 20 Wen JH (文金花), Ma YS (马玉寿), Shi JJ (施建军), Dong QM (董全民), Wang YL (王彦龙). Study on vegetation rebuilding of "black soil type" degraded grassland with *Poa pratensis* in the riparian areas of rivers. *Grassl & Turf* (草原与草坪), 2006 (2): 41~45
- 21 Chen G (陈刚), Sun GR (孙国荣), Peng YZ (彭永臻), Ma DH (马东辉), Yue ZH (岳中辉), Na SH (那守海), Yan XF (阎秀峰). Effect of nitrogen accumulation in *Puccinellia tenuiflora* grassland on the succession of vegetation in Songnen alkaline grassland. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2008, **28** (5): 2031~2041
- 22 Su YG (苏延桂), Li XR (李新荣), Zhang JG (张景光), Yang LW (杨丽雯). Effects of biological soil crusts on seed bank. *J Desert Res* (中国沙漠), 2006, **26** (6): 997~1001
- 23 Cao GM (曹广民), Long RJ (龙瑞军). The bottleneck and its resolutions to the natural recovery of black soil type degraded grassland in the Three River Source Region. *Acta Agrestia Sin* (草地学报), 2009, **17** (1): 4~9
- 24 Zhang QF (张庆费), You WH (由文辉), Song YC (宋永昌). Effect of plant community succession on soil chemical properties in Tiantong, Zhejiang Province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1999, **10** (1): 19~22
- 25 Qu GH (曲国辉), Guo JX (郭继勋). The relationship between different plant communities and soil characteristics in Songnen Grassland. *Acta Pratacult Sin* (草业学报), 2003, **12** (1): 18~22
- 26 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
- 27 Zhou LK (周礼恺). Soil Enzymology. Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 1987
- 28 Pu XP (蒲小鹏), Li CR (李春荣), Bai XM (白小明), Zhou Y (邹雨). A preliminary research on soil enzymatic activities in turfs in different growth year. *J Gansu Agric Univ* (甘肃农业大学学报), 2008, **43** (4): 121~123
- 29 Yue ZH (岳中辉), Wang BW (王博文), Wang HF (王洪峰), Yan XF (阎秀峰). Polyphenol oxidase activity and its relationship to the soil main fertilizer factor in west Songnen alkali grassland. *Acta Pratacult Sin* (草业学报), 2009, **18** (4): 251~255
- 30 Dick WA. Influence of long-term tillage and crop rotation combination on soil enzyme activities. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, **48**: 569~574
- 31 Li YL (李跃林), Li ZH (李志辉), Peng SL (彭少麟), Ren H (任海), Zhu MG (朱目光), Li ZA (李志安). Application of canonical correlation analysis in the relation between soil enzyme activities and nutrient elements in eucalyptus plantation soils. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (5): 544~549
- 32 Naidja A, Huang PM, Bollag JM. Enzyme-clay interactions and their impact on transformations of natural and anthropogenic organic compounds in soil. *J Environ Quality*, 2000, **29** (3): 677~691
- 33 Zhang ZM (张志明), Cao CM (曹承绵), Zhou LK (周礼恺). Research on the enzyme activity of agricultural brown soil. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1984, **21** (6): 281~285
- 34 Liu GS (刘广深), Xu DM (徐冬梅), Xu ZJ (许中坚), Wang HY (王红宇), Liu WP (刘维屏). Relationship between hydrolase activity in soil and soil properties in Zhejiang Province. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2003, **40** (5): 756~76