第 22 卷第 7 期
2002 年 7 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 22, No. 7
Jul., 2002

利用 PPR 新方法建立草地产量增长模型及生态成因机理研究

李建龙，蒋 平*，朱 明，宋子健，赵德华

（南京大学生命科学学院应用生态研究所，南京 210093）

摘要：利用新型的投影寻踪回归(PPR)统计方法、对新疆天山北坡高属荒漠草地上观测的 3a 草地产量和其它 6 个相关生态因子数据，进行了多元回归统计分析和 PPR 分析，建立了 PPR 新型牧草增长模型，并进而做了产量生态成因机理分析和理论解释。研究结果表明，在一般年份下，干草产量在不同年代不同季节均随降水量的分配状况而发生有规律的变化，产量分配呈现双峰模式；在降水量、积温和光照时数 3 个影响产量形成和高低的生态因子中，尤以降水量影响最明显，是主导生态因子，但牧草生长发育状况和增长类型则是水热因子、质地、牧草生态习性和种类组成共同作用的结果；在建立草地产量增长模型和成因机理分析过程中，充分运用 PPR 统计方法成功地克服了非正态非线性高维数据点稀疏所造成的"维数祸根"和自动排除了无关因子及人为因素的干扰，提高了建模的精度和效能，并给出各自变量因子对建模贡献率大小的效果，科学地揭示了用其它多元回归统计方法，所难以发现的数据内在的结构特征和规律性。进而，运用建立的 PPR 模型，较好地估测和拟合实测产量值，使模型估产精度达 90%以上，并通过了效果检验和给出了贡献率统计分析。在 6 个自变量因子中，对牧草产量增长量贡献值最大的是生长时期(T)，其次为土壤含水量(SW)、降水量(PR)、气温(AT)和土壤温度(ST)，最小为草地类型(GT)值。多年研究结果为合理利用天山草地和深入了解草地生态系统形成机理，提供了坚实的科学依据和建模的新方法等。

关键词：PPR 方法；天山草地；建立 PPR 模型；产量成因机理分析

The Study on Establishing Growth Patterns of Grassland Yields and Analysis of its Ecological Formations Using New PPR

LI Jian-Long, JIANG Ping*, ZHU Ming, SONG Zi-Jian, ZHAO De-Hua (*Department of Biological Science, Nanjing University, Nanjing, 210093, China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 973～981.**

Abstract: Using the Projection Pursuit Regression (PPR) method, the multivariate regression statistical and PPR analysis were made between the grassland yields and six other relative ecological factors observed on the desert steppe in the northern slope of Tianshan, Xinjiang in 1992～1994. The PPR regression models of herbage growth were set up, and the formations of grassland yields were analyzed and theoretically explained about them. The results showed that hay yields regularly varied according to precipitations and possessed a bimodal distribution in common years. Among the three factors (precipitation (PR), accumulated temperature (AT) and light duration affected the herbage yield formations), precipitation was the chief ecological one. However, the growth conditions and patterns of herbages were resulted jointly by hydrothermal factors, soil textures, ecological habits and species compositions. While setting up the growth models of grassland yields and analyzing the yield formations with PPR method, the dimensional curses brought about by rarefaction of nonnormal and nonlinear higher dimensional data points and the interference of independent factors and anthropogenic factors were

基金项目：国家自然科学基金资助项目(30070432)；国家教育部高等学校优秀骨干教师基金资助项目(1999 文)

* 通讯联系人 Author for correspondence.

收稿日期：2002-01-14；**修订日期**：2002-04-10

作者简介：李建龙(1962～)，男，东北长春市人，博士，教授。主要从事草地生态学、信息生态学和城市生态学研究。

万方数据

automatically eliminated. Thus, the precision and effectiveness of setting up growth models were enhanced by the PPR method. The study also offered the results and contribution of each variance in the PPR model, and scientifically brought out the internal structural characters and regularity of the data indiscoverable than other multivariate regression statistical methods. The real grassland yields were estimated and that fitted well with the PPR regressive estimating model in 5 types. The estimating precisions were above 90%. The models passed the effective verification and the statistical analysis of contributive rates was done. Among the 6 variances, growth periods (T) had the greatest contributive rate to herbage yields, and soil water contents (SW), precipitations (PR), accumulated temperatures (AT), soil temperatures (ST), grassland types (GT) followed decreasingly in succession. Our results provided foundations for reasonable utilization of grassland and understanding of the yield formative mechanism in grassland ecological systems.

Key words: PPR new method; grassland in Tianshan; setting up of PPR model; yield formative effect analysis

文章编号:1000-0933(2002)07-0973-09 **中图分类号**:S812.5 **文献标识码**:A

草地产量是衡量草地生产力高低的一个重要指标,对其产量成因和动态变化规律的研究,是草地生态系统研究的重要内容,一直被国内外生态学家和草地工作者广泛重视[1~8]。然而,以往的研究工作中[4~12],有关天山天然草地上进行长期草地产量动态观测和成因分析等研究还不多见[1],对其草地群落和生态系统的结构和功能等报道不多。而天山北坡天然草地面积是中国第四大天然草地,类型繁多、种类丰富,地带性强,具有重要研究和利用价值[2]。加之,草地产量是牧草同生态环境相互作用的重要标志,也是草地群落结构和功能的综合体现。因此,应用先进的 PPR 方法建立生态因子对草地产量动态变化影响模式和研究牧草生长与其生态环境间的关系,能更好地对草地初级生产力进行预测预报,为畜牧业生产服务[7]。草地产量形成与生态因子之间相关性分析的研究,已备受各国生态学者所重视[4,6,10,13],但是,这些研究多为单一或少数几个气候因子对草地产量的影响,而未将影响草地产量形成的多个生态因子及影响程度和内在关系做深入研究,尤其是对产量成因,做环境解释定量分析不够,也未做非正态分布,非线性高维数据与产量增长量的多元相关分析[13~15]。为此,本文引入了新型投影寻踪回归统计方法(PPR)用于草地产量增长模型建立,产量形成机理和环境解释定量分析等。

投影寻踪回归(Projection Pursuit Regression,简称 PPR)统计方法,是国际统计界于 20 世纪 90 年代中期发展起来后,由新疆农业大学邓传玲先生等改进成的一项新型的分析方法,属集应用数学、现代统计学和计算机技术及预测学为一体的交叉科学[15~17]。经多年研究和改进,由邓传玲和李建龙等研制成的 PPR 软件包十分适用于处理和分析多元数据,尤其是非正态、非线性的高维数据,其显著优点是具有很高的精度和稳定性,并能成功地克服高维点稀疏造成的"维数祸根"和能自动排除无关因子的干扰,及排除单项异常判别带来的人为干扰问题,可揭示用其它传统方法难以发现的高维数据的内在特征、规律和结构,并能以定量数值函数表征其结构后建模及直接用于未来产量的预报。其实质是利用投影寻踪降维技术来处理和分析高维观测数据 Y 和 X 的相关关系,建立相应的回归模型,其 PPR 产量模型通式可表达为:DP(平均干草增长量)$=R_1G_1(A_1^T \cdot X)+R_2G_2(A_2^T \cdot X)$,式中 R_1、R_2 分别为 G_1、G_2 对模型的贡献率;G_1、G_2 为两个优选岭函数;A_1^T、A_2^T 为两个自变量多项式。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 位于中国新疆石河子市南山紫泥泉种羊场,属于天山北坡中段低山带蒿属荒漠春秋草场,地处北纬 43°29′~44°05′,东经 85°18′~85°58′。海拔高度 1100~1160m,低山丘陵地形,山体构造以东西走向的山脊连接南北走向的指状山岗,形成一系列指状侧沟。侧沟由东、西山坡和北向坡构成。土壤主要类型为淡栗钙土。试验区主要受大陆性气候控制,多年平均降水量为 300mm,多年平均气温为 6.1℃,多年平均蒸发量 1650mm,无霜期 150~175d。地带性草地类型为伊犁绢蒿(*Seriphidim transillensis*)荒漠草地,在

万方数据

不同坡向、坡段上有所差异,有规律地形成 5 个不同草地亚型,各类型的主要组成牧草(多度>CoP1)有:伊犁绢蒿、木地肤(*Kochia prostrata*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、短柱苔草(*Carex turkestanica*)、羊茅(*Festuca ovina*)和针茅(*Stipa capillata*)等(表 1)。每个试验区外围都建立了网围栏,设立固定样条进行产量、结构和环境因子观测,全封闭不放牧。

1.2　观测内容与方法　从 1992 至 1994 年连续 3a 观测以下项目:

(1)草地类型观测　按 5 个地形部位(东坡上段、东坡下段、西坡上段、西坡下段和北坡)(下同),在牧草生长旺期进行植被样地常规记载,测产和产量结构分析及类型划分,确定复合体结构成分及各成分所占比重和计算 $SDR_2=\frac{(\text{相对盖度}+\text{相对产量})}{2}\times 100\%$ (见表 1)。

(2)生态环境气候因子观测　利用不同坡位上,放置的自记雨量计测定实时降水量(mm);利用 5 个地形部位上放置的最高、最低,地面和地下曲管温度计,从每年的 4 月中旬到 10 月中旬每天观测 3 次 5 个地形部位上的最高温度、最低温度,地面(0 cm)温度和地下 5、10、15、20cm 处地温;分别从 5 个地形部位上分 4 层(0～10,10～20,20～30,30～40cm)用地钻法取土,在 105 C烘箱内烘 12～14h,用烘干法计算每层土壤含水量(%)$\left(SW(\%)=\frac{W_1-W_2}{W_2-W}\times 100\right)$。从每年的 4 至 11 月份每隔 5d 观测一次;同时每隔 5d 用双吊筒法观测土壤蒸发量[3]。

(3)草地产量测定　在 5 个不同坡位上设置的样条内,按随机区组排列抽样,利用收获法取 1m×1m 典型样方,分种齐地面刈割,分别称重,取样放入 65 C烘箱内烘 8～10h,称重,计算各种牧草的干草重量(DM),每年从 4 月至 10 月每隔 15d 观测一次,重复 4 次,求平均值。

(4)数据加工与统计分析　所有观测值首先进行校正,求平均值后,进行方差分析和多元相关分析,在 $P<0.05$ 水平下进行方差分析和显著性检验。然后输入 PPR 软件包进行资料处理,模型建立和结构分析。

表 1　不同地形部位不同草地类型草地基本状况与组成结构

Table 1　SDR_2 values and components of different grassland types in different topographic positions

草地类型 Grassland types	地形部位 Topographic positions	质地 Quality	主要组成牧草 Main herbage species	多度(%) Abundances	相对盖度(%) Relative covers	相对产量(%) Relative yields	SDR_2^* 值(%) (SDR_2^* value)
$1GT_1$	东坡上段①	砾质沙壤土⑥	伊犁绢蒿②	Cop3	83.4	93.9	88.7
$2GT_2$	东坡下段②	粉壤土⑦	伊犁绢蒿⑩	Cop2	55.6	69.0	62.3
			角果藜	Cop2	33.3	22.7	28.0
$3GT_3$	西坡上段③	砾质沙壤土	伊犁绢蒿	Cop2	73.3	81.2	77.3
			木地肤⑪	Cop1	13.8	11.1	12.5
			短柱苔草⑫	Sp	5.9	7.20	6.60
$4GT_4$	西坡下段④	粉壤土	伊犁绢蒿	Cop2	72.9	72.5	72.7
			短柱苔草	Cop1	12.5	10.1	11.3
$5GT_5$	北坡⑤	细壤土⑧	伊犁绢蒿	Cop2	60.0	70.2	65.7
			羊茅⑬	Cop1	20.2	22.0	21.0
			短柱苔草	Cop1	13.3	5.40	9.40

*$SDR_2=[(\text{相对产量}+\text{相对盖度})/2]\times 100\%$ ①upper of eastern slope ②lower of eastern slope ③upper of western slope ④lower of western slope ⑤norther slope ⑥Sandy loam ⑦fine loam ⑧loam ⑨*Seriphidim transillensis* ⑩*Ceratocarpus arenarius* ⑪*Kochia prostrata* ⑫*Carex turkestamica* ⑬*Festuca ovina*

2　结果与分析

2.1　运用新型 PPR 统计方法的基本准则

投影寻踪降维技术过程与 PPR 中的投影寻踪降维技术是,按最小二乘法原理先为高维观测数据 X 寻找一个或多个(M 个)投影方向,通过投影获取到一维或 M 维投影资料点 T,然后寻找到使原数据 X 在新的资料点上能显示出有意义的结构特点,进而在 M 个 Y-T 平面上建立 M 个平滑函数,PPR 回归模型就是由这 M 个平滑函数构成,可表达成如下形式:

万方数据

$$Y = \overline{Y} + \sum_{m=1}^{m} \beta_m f_m(a^t x) \tag{1}$$

式中，a_m^t 表示当 $m=1,\cdots,m$ 时，为第 m 个投影方向，f_m 为 Y 与第 m 个投影资料数据 T_m 间的相关平滑函数，β_m 为第 m 个平滑函数对回归模型的贡献率。寻找 m 个投影方向和降维技术的准则，就是按最小二乘原理，使因变量 Y 的残差平方和 $L_2=E(y-\overline{Y})^2$ 最小，简化分析高维观测数据 Y 和 X 的相关关系，建立相应的优化回归模型和给出回归效果图等。

2.2 建立 PPR 模型回归因子选择

从实测大量数据中整理出 115 组典型观测数据，这些数据可反映 5 种草地类型 1992 年至 1994 年的全部牧草生长过程，每组数据包含选择了对牧草生长和产量形成具有重要影响的 7 个生态因子或变量。他们分别为 DP(kg/(hm^2 · d))表示每个测产时段的干草平均增长量；SW(%)表示本时段中 0～40cm 土层平均土壤含水量；ST(℃)表示该时段的 0～20cm 土层内平均土壤温度；AT(℃)表示该时段的平均气温；PR(mm)表示本时段内的实际降雨量(为积累值)；T 表示该时段所对应的生长期天数(d)；GT 表示不同的草地类型，共有 GT1、GT2、GT3、GT4 和 GT5 等 5 个草地类型(即 1,2,3,4,5 等，5 种取值)(表 1)。

2.3 天然草地产量年季动态变化特征分析

由方差分析结果表明，年代因子与不同测期时段各水平间差异显著($P<0.05$)，而样方因子各水平间并无显著差异($P>0.05$)。从表 2 可见，干草产量随不同年代和季节(时段)变化而有明显变化，1992 至 1994 年 3a 年均干草产量均不同，是 1992 年年均干草产量最高，1993 年居中，1994 年最低，这与 3a 的年总降水量有密切关系。同时，干草产量在同一年代内不同测期也有明显变化，一般产量在 6～7 月份达最高峰，秋初较低秋末产量开始增高，呈夏中和秋末两个产量高峰，显示出双峰型产量模式，尤其在 1992 年表现更为明显(表 2)，这与每年降水量多集中在 6 月初至 7 月末有关，而 8 月中旬至 9 月中旬相对降雨少而气温升高导致该区出现夏旱产量低谷的现象。同时这种结果也与草地组成牧草的生长习性，中亚荒漠气候特征和牧草夏季休眠有关，而出现产量波动变化规律。但不同年代不同季节草地牧草产量高峰出现的时间和高度，因受气候因素尤其是降水量和温度的综合影响而有所差异。在干旱和半干旱地区，尤其是水分是群落和植物种群地上生物量随年季波动的限制因子，这一观点已被许多学者的研究所证实[5,9,10,12,13]。一般年份则牧草干草产量是随降水量增加而增高，而且从表 2 可见，不同季节的降水量对产量高低的影响比年均降水量的影响还明显(产量年度变异为 729.2～2059.5kg/hm^2，高产年的产量是低产年产量的 2.8 倍；而产量季节变异为 793.5～2589.0kg/hm^2，高产季产量是低产季产量的 3.3 倍(1992 年)；而在 1994 年季节产量变异为 351.0～1353.0kg/hm^2，高产季产量是低产季产量的 3.9 倍多)。而且越是在旱年不同季节的产量变异更大(1994 年产量季节变化大于 1992 年)[1,13]。最终结果表明降水的季节分配不均，导致了荒漠草原产量动态变化不平衡的现象出现。

表 2 草地牧草产量平均动态变化结果(kg/hm^2 DM)(5 类型的平均产量)

Table 2 Mean dynamic results of grassland yields in 5 types

年份 Year	测期(日/月)Periods (Day/Month)							年平均产量 Mean yields
	15/4	15/5	15/6	15/7	15/8	15/9	15/10	
1992	1984.5	2518.5	2589.0	2415.0	2241.0	793.5	1876.5	2059.7
1993	597.0	808.5	1068.0	1441.5	1210.5	712.5	1354.5	1027.5
1994	723.0	891.0	796.5	1353.0	577.5	351.0	412.5	729.2

2.4 天然草地产量与主要气候因子的相关性分析

研究主要气候因子对天然草地牧草生长发育及产量形成的影响，对揭示天然牧草自身生态学生物学变化规律，确定牧草产量，指导合理利用草地是重要的。因此不仅要研究牧草产量形成与各主要生态气候因子的关系，而且也要找出影响草地牧草产量高低的主导生态因子。用 1992 年至 1994 年 3a 平均产量与降水量、积温和光照时数 3 个生态气候因子进行了相关分析，求出了相关系数(表 3)，其中积温和日照时数从

万方数据

春季日平均气温稳定通过 0℃的日期开始累积计算，降水量由于考虑到前期降水对后期牧草的影响，从前一年 11 月份起累积。从表 3 可见，干草重与 3 个生态因子的相关性均较好，总产 r 值在 0.841～0.896，达到 $P<0.01$ 极显著水平，其中在 3 个主要气候因子的 r 值中，尤以降水量最大，积温居中、日照时数较小，表明干草产量与降水量的相关性最好，其次为温度、降水量是影响产量形成的主导生态因子。在各类型牧草中、所获趋势基本一致，各类牧草干重与降水、积温和日照时数的相关性均较好，其 r 值为 0.611～0.882，除其它杂类草干重与日照时数的 r 值达到 0.05 显著水平外，其余均达到 0.01 极显著水平，其中各类牧草干重尤与降水量相关密切，r 值为 0.761～0.882，达到 0.01 极显著水平。

根据相关系数的分析结果，应用常规多元回归分析方法，建立了禾本科类草和其它科类草和总产的干重(y)与积温(x_1)和降水量(x_2)的多元回归估产模型(表 4)，从表 4 可见，各类牧草干重与总产干重都与两个主要生态因子(积温和降水量)有极好的相关性和回归效果，其统计结都通过 0.01 极显著检验，r 值在 0.769～0.898 之间，通过 F 检验($P<0.01$)，且禾本科草类与 2 个生态因子的相关性好于杂类草与 2 个生态因子的相关性($r_1=0.891>r_2=0.769$)，所以，用降水、积温可较好地估测和预报天然牧草的产量，也可预报禾草、杂类草等各种牧草的单产，但降水因子、积温因子和其它因子对产量形成和产量高低影响程度和贡献率，以及降水与温度对产量形成影响关联性，并了解内在数据结构特征和拟合效果，用该分析方法则很难看出，从而具有一定局限性[13,16,18]。

表 3　草地产量与主要气候因子的相关系数分析结果

Table 3　The correlation coefficients between herbage yields and main climate factors

气象因子 Climate factors	干草产量(kg/hm² DM)Herbage yields		
	禾本科草类 Gramineae	其它类草 Other grass	总产 Total yields
降水量 Precipitation	0.882**	0.761**	0.896**
积温 Cumulative temperature	0.871**	0.674**	0.860**
日照时数 Light times	0.870**	0.611**	0.841**
平均 Average	0.874	0.682	0.866

表 4　草地产量与主要气候因子的回归模型与检验结果

Table 4　The models and checking effects between herbage yields and main climate factors

牧草产量(干重) Hay yields (kg/hm²)	回归模型 Regression model	r	F
禾本科草类*	$y=-122.26+0.47x_1+2.05x_2$	0.891	21.20**
其它类草	$y=-70.57-0.19x_1+1.83x_2$	0.769	7.975*
总　产	$y=52.92+0.29x_1+3.85x_2$	0.898	22.781**

* 同表 3 Same as table 3

2.5　建立天山草地产量 PPR 增长模型

首先，执行 PPR 统计软件包的数据输入功能，将 115 组实测数据整理成原始数据文件，再执行 PPR 软件包的自变量因子预处理和选择功能，通过分析 DP 与各个因子的散点关系图，决定该因子是否入选参与 PPR 牧草生长增量建模处理。从 PPR 散点关系图分析可见，数据点相对有所分散，而用传统的多元线性回归方程，很难对这 6 个因子共同对牧草产量增长量和模式，进行相关分析和找出成因规律，因为传统的多元线性回归方程方法都是首先假定数据要为线性的和成正态分布，才能进行相关分析和建立模型。利用 PPR 软件包的建模功能，将选定的 DP 和另 6 个相关生态因子 SW，ST，AT，PR，T 和 GT，按最小二乘法原理，对投影方向进行迭代筛选优化，最后输出两个 Y-T 平面上平滑曲线的图象-岭函数图

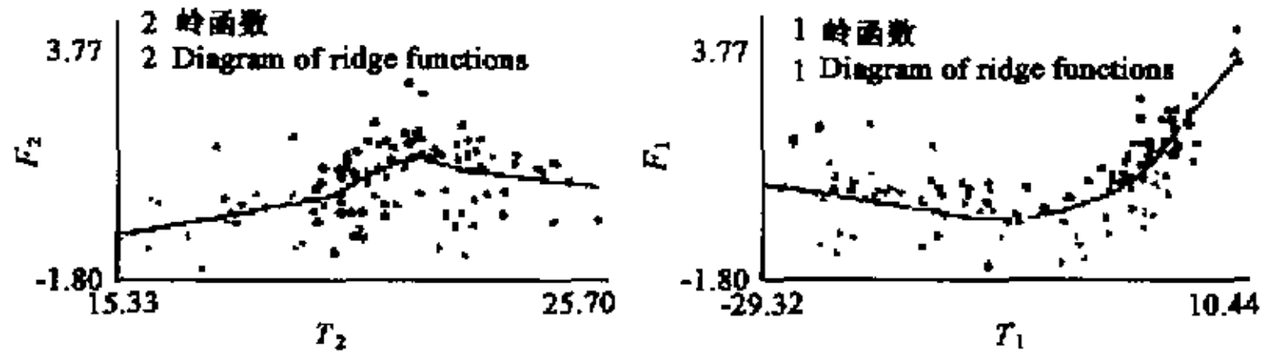

图 1　PPR 模型中的岭函数

Fig. 1　Diagram of ridge functions in PPR models

万方数据

(图 1),建立 PPR 牧草增长量回归模型,做出预留效果检验图(图 2)和给出有关回归模型中各种参数及对建模的贡献率和相对权重值等。

PPR 牧草增长量回归模型为:

$$Y(\text{干草产量增长量}) = \frac{DP - \overline{DP}}{\delta_{DP}} = \beta_1 f_1(T_1) + \beta_2 f_2(T_2) = 0.8002 f_1(T_1) + 0.4150 f_2 T_2 \quad (2)$$

$$T_1 = \alpha_{11}\chi_1 + \alpha_{12}\chi_2 + \cdots + \alpha_{16}\chi_6 \quad (3)$$

$$= -0.0632 \times SW + 0.6791 \times ST - 0.5158 \times AT + 0.4359 \times PR - 0.1533T + 0.2352GT$$

$$T_2 = \alpha_{21}\chi_1 + \alpha_{22}\chi_2 + \cdots + \alpha_{26}\chi_6 \quad (4)$$

$$= 0.8679 \times SW + 0.2751 \times ST + 0.1550 \times AT - 0.2061 \times PR - 0.0486T + 0.3196GT$$

其中,式中 Y 为日均产量的标准化处理值,DP 为日均产量,$\overline{DP}$为日均产量平均值,σ_{DP}为日均产量方差值,$f_1(T_1)$和 $f_2(T_2)$分别为 T_1 和 T_2两个多项式的两个平滑函数,利用(2)~(4)模式就可进行牧草生长量计算和产量预报。

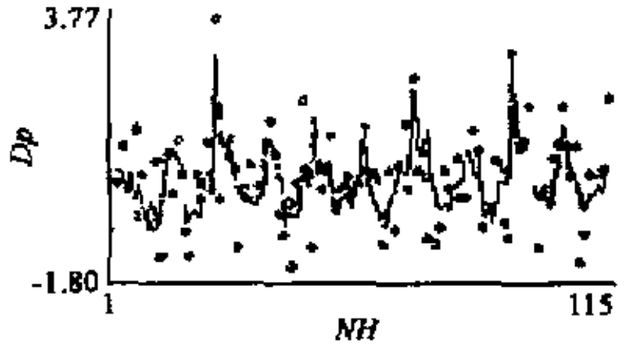

图 2 在 PPR 建模过程中,回归及预留检验效果

Fig. 2 Effective diagram of regression and remainder tests in PPR models

由以上结果分析可知,PPR 回归模型建立过程的核心是首先将 6 个相关因子按(3)、(4)式进行线性组合(即投影),变成 2 维数据 T_1,T_2,进而用滤波方法产生图 1 所示的两个平滑函数 $f_1(T_1)$,$f_2(T_2)$,再按(2)式建成回归模型和给出相应参数值,且由图 1 可见,f_1,f_2 均呈非线性状,图中小圆圈表示实测数据点在投影平面上,数据点云的分散度比单因子散点图各因子图降低了,而相关性增加了和规律性突出了,易看出数据组内在的结构和规律性,说明利用 PPR 软件包处理数据后,经投影降维后,确实达到了揭示非正态非线性高维数据间存在的内在结构特点和规律性。

2.6 PPR 回归模型效果检验与牧草产量成因机理系统分析

PPR 软件包不仅可以进行因子间相关分析和建模,还可按下式求出每个自变量因子对回归模型的贡献率:

$$Hi = Vi \times \sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}\left\{\frac{\Delta F}{\Delta T m}(j) \times \beta_m \times \alpha_{mi}\right\} \quad (5)$$

在(5)式中,Hi 表示第 i 个自变量对 PPR 模型的贡献权重值,本文中 $i=1,2,\cdots,6$,Vi 为第 i 个自变量的方差,$\frac{\Delta F}{\Delta T_m}(j)$表示第 m 个平滑岭函数上第 j 点上的差分,它代表 $f_m(T_m)$平滑岭函数在第 j 点上的斜率,可见自变量因子对模型的贡献率(权重值)是由因子方差,投影系数 α_{mi},平滑岭函数斜率和权重所综合决定的(表 5)。

表 5 6 个自变量因子对 PPR 回归模型贡献权重值和顺序

Table 5 The contributing weight orders and values of 6 independent variables in PPR models

权重顺序 Weight order	1	2	3	4	5	6
自变量因子 Factor	T^{a*}	SW^b	AT^c	ST^c	PR^c	GT^d
相对权重值 Relative weight value	1.00[a]	0.70[b]	0.46[c]	0.43[c]	0.41[c]	0.07[d]

* 具有不同字母的,表示两者差异在 $P=0.05$ 水平下显著($P<0.05$) There is the degree of suitability at $P<0.05$

由于 PPR 牧草生长回归模型完全是根据实测数据内在结构特征、不加任何人为假设而建立的,所以它能比较客观揭示自变量与自变量之间的相关关系,克服非正态非线性高维数据点稀疏造成的"维数祸根";并可自动排除无关因子的干扰,及排除单项异常判别带来的人为干扰问题,可表达出用其它传统方法难以发现的高维数据的内在特征和结构,并能以定量数值函数表征其结构后,直接用于未来值的预报。因此,由 PPR 牧草生长模型回归效果检验图 2 可以看出,本文建立的牧草生长增量模型能够比较好地拟合 5 种草地亚型牧草产量增长变化趋势,模型估测值与田间实测数值基本吻合(其中图 2 中小圆圈表示实测值,连线表示模型回归估测值),从图 2 可见,它反映出 5 个草地亚型牧草生长前期日增重速度由快到慢,

万方数据

后期又由慢到快的过程,呈现产量增长双峰曲线的特性,即反映了该地 5 个草地亚类牧草生长春秋出现两个生长高峰和夏末牧草休眠呈低谷规律,它极大地符合了中亚荒漠气候下牧草生长节律和产量形成规律,这种现象是中亚荒漠干旱气候,草地牧草组成成分和低山地形与质地综合影响所致(见表 2)。

由表 5 可见,生长周期 T 的贡献权重值最大,其次为 SW,而 AT、ST 和 PR 居中,GT 的贡献权重值最小。从其方差分析结果可见,T 与 SW,T 与 AT、ST 和 PR 及 T 与 GT 之间,SW 与 AT、ST 和 PR 及 SW 与 GT 之间,AT、ST 和 PR 与 GT 相对权重值之间有明显的差异($P<0.05$),而 AT 与 ST 与 PR 之间相对权重值无显著差异($P>0.05$),表明牧草产量形成和产量增长量与其各种组成牧草生长发育阶段和生长期有密切的相关性,而与所处亚类地形关系不明显,说明在不太大环境范围内,各亚类产量间差异不明显(表 1),在生境变化不大,导致各亚类对产量增长量和模式影响不大(相对权重值小于 0.1);而在 4 个水热生态因子中,土壤含水量 SW 的贡献权重值最大,为 0.70,说明在干旱半干旱荒漠地区,水分对产量形成和增长模型作用最大,其中在低山草地土壤含水量是降水量多少的反映,因土壤含水量可直接被牧草生长所吸收,因此,土壤含水量 SW 是影响牧草增长量的主导生态因子,而牧草产量形成和生长发育阶段成因,也一定程度上受到 AT、ST 和 PR 的作用,是降水、温度、土壤基质诸因子共同作用的结果,但主要受到生长期和土壤水分的影响,它的分布规律和增长模式完全受水热诸因子的控制,但在各生态因子中,贡献率和影响程度有所差异,这与其他学者的研究获得了类似的结论[4,6,8~12]。说明在该地区牧草生长类型和模式主要受牧草生长发育阶段和生长期所决定;而产量成因和增长量则主要受水热因子,尤其是土壤水分(SW)所决定[21~35]。

2.7　天山天然草地结构分异规律的形成机理系统分析

由于不同地形部位,土壤含水量有明显差异,导致了该类型草地结构发生了分异,形成了 5 个草地亚型。根据对观测的 4080 个土壤含水量数据的综合,取 4 月下旬至 6 月下旬该地区牧草主要生长期在 0～40cm 土层内平均土壤含水量(%)对比分析,其结果如表 6 所示。

表 6　不同地形部位平均土壤含水量变化结果(0～40cm 平均值,%)

Table 6　The results of mean soil moisture changes in different topographic position (0～40cm soil,%)

坡位 Slope	测期(日/月)Periods(Date/Month)													对比%	排序 Ranges
	20/4	1/5	8/5	11/5	18/5	28/5	31/5	6/6	12/6	16/6	22/6	26/6	平均		
北坡	22.17	22.3	22.77	20.19	17.12	18.02	16.03	16.15	20.78	16.03	15.78	14.23	18.48^{a}	100**	1
西坡下段	15.42	16.07	17.12	14.97	14.72	14.48	13.48	15.04	17.59	13.76	13.94	11.93	14.88^{b}	80.52**	2
东坡上段	15.98	15.79	17.01	16.25	14.83	13.58	12.39	14.10	18.82	13.90	13.33	12.52	14.64^{b}	79.22**	3
西坡上段	14.04	13.37	14.94	14.31	13.58	13.30	12.41	14.84	15.57	12.28	14.66	13.24	13.86^{c}	75.00*	4
东坡下段	14.64	18.24	15.79	14.89	13.44	12.58	11.89	13.28	14.70	11.85	11.86	11.57	13.53^{c}	73.21*	5

由表 6 数据方差分析结果得出,北坡土壤含水量最高,极显著高于其它 4 个地形部位($P<0.01$);西坡下段与东段上段土壤含水量较高,极显著高于东坡下段($P<0.01$),显著高于西坡上段($P<0.05$),西坡下段略高于东段上段,西坡上段高于东坡下段,但两者 SW 差异不显著($P>0.05$),总的 SW 趋势是北坡 SW > 西坡下段 SW > 东段上段 SW > 西坡上段 SW > 东坡下段 SW,0～40cm 土壤平均含水量分别为 18.40%,14.88%,14.60%,13.86%和 13.53%。一般而言,土温对土壤水分蒸发有影响,从而改变了土壤的水分状况。本试验中以北、西、东坡三者对比,由于土温差异不大,6～7 月份土壤日平均蒸发量依次为 4.95,4.98 和 5.03kg/m^3,差异并不显著,说明不同坡位上土壤含水量的差异不是主要由不同地形部位上土壤温度的变化所影响,而是主要受中地形和土壤基质变化所致,相应引起了不同草地亚类的发育和分异。天山北坡低山带下缘,仍受荒漠大陆性气候所控制,地带性草地类型为伊犁绢蒿荒漠,但由于有东、西、北坡向、坡位和坡度的分异及土壤质地北坡和东、西坡下段为粉壤土,东、西坡上段为沙壤土,黄土层在东、西坡上段局部被侵蚀,地表为砂砾覆盖,从而导致土壤基质的变化(表 1)。由于以上地形、土壤基质变化,造成的水热再分配,集中反应在土壤含水量 SW 的变化上,随之发生了草地类型的分异,形成以伊犁绢蒿荒漠为主体的草地复合体。其 5 个结构成分随水分变化梯度而演替发生,概括为以伊犁绢蒿型为中线,随水

万方数据

分增加向伊犁绢蒿、短柱苔草亚型、再向伊犁绢蒿、羊茅、苔草型(北坡、草原化荒漠类)演替;反之随水分减少,向伊犁绢蒿、木地肤亚型,再向伊犁绢蒿、角果藜亚型演替[20~24]。

3 结论

3.1 经对 3a 不同季节观测的牧草干草产量变化规律分析,干草产量在不同年份不同季节随着降水量的变化而发生明显变化,一般产量在 6~7 月份间达最高峰,秋初开始降低呈低谷,到秋末开始增高,出现夏中和秋末双峰型产量增长构成模式。在一般年份,牧草干草产量是随降水量的增加而增高,且有"滞后效应",达 1/4 周期,水分是影响干旱半干旱区荒漠草地牧草产量形式和增长模式的主导限制因子;同时,牧草的生长发育状况和增长类型则是生态气候因子、牧草生长习性和种类组成综合作用的结果,弄清了产量形成机理。

3.2 在对牧草干草产量与 3 个主要生态因子之间所做的相关分析结果表明(表 3~表 4),干草产量与降水量、积温和光照时数之间具有较好的相关性,r 值均达 0.841 以上,且通过 F 检验,其中尤以降水量与产量相关性最好,其次为积温,再次为光照时数。研究结果表明在荒漠大陆性气候控制地区,牧草产量的高低主要受到降水量多少和分配状况所支配,而本地区的温度和光照条件基本能满足了各类牧草生长发育所需。进而,建立了干草产量与积温和降水量的多元回归估产模型,为今后预报草地产量奠定了科学基础。

3.3 在草地牧草生长量增长模型建模和效果检验及成因分析中,运用改进的 PPR 新型软件包和统计方法,成功地克服了非正态非线性高维数据点稀疏造成的"维数祸根"和能自动排除无关因子的干扰和人为因素影响问题,不仅可建立高精度的 PPR 回归牧草增长模型和进行效果检验,而且可做出各自变量因子对模型的贡献权重值和拟合曲线。这为揭示用其它传统方法-多元回归统计方法等所难以发现的数据的内在特征、规律和结构提供了条件,为深入研究草地产量形成机理提供了科学方法[26~30]。

3.4 利用 PPR 软件包进行数据整理、加工和相关分析,选定建模参数,做出拟合散点图和平滑岭函数图,建立了 PPR 牧草增长模型,模型估产精度达 90%以上,其模拟产量增长值与田间草地实测值基本吻合。在 6 个自变量生态因子中,对牧草增长量贡献值最大的是生长时期,依次为土壤含水量,降水量,大气温度和土壤温度居中,最次为草地类型,该结果基本符合荒漠干旱区牧草生长发育节律和产量形成规律,其中在 4 个主要产量形成生态因子中,尤以土壤含水量对产量形成和增长模式影响最大,并进而对回归模型内在结构特征和增长模型成因,也做了进一步机理分析和系统理论解释,比较客观系统地揭示了因变量与自变量的相关关系和牧草生长发育及产量增长动态规律成因机理等。

参考文献

[1] Xu P(许鹏), Li J L(李建龙), Li Z C(李正春). Study on the dynamic of grassland yields on the winter-spring-autumn grassland in Zi Niquan ranch. *Animal Husbandry of China*(in Chinese) (中国畜牧), 1980, (1): 40~42.

[2] Xu P(许鹏). Discussion on the rule and system for grassland classifying of China. *Grassland of Sichuan* (in Chinese)(四川草地), 1985, (3): 1~7.

[3] Jiang S(姜恕). *Researching methods of grassland ecology*(in Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1987. 4~66.

[4] Zhao Y Z(赵一之). Study on the formation of *Aneurolepidium chinese* herbage yields. *Journal of Inner Mongolia University* (in Chinese)(内蒙古大学学报), 1962, (2): 10~13.

[5] Zhu T C(祝廷成), *et al*. Monitoring of dynamic yield of *Aneurolepidium chinese* in Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*(in Chinese) (中国农业科学), 1964, 3: 49~50.

[6] Guo J X(郭继勋), Zhu T C(祝廷成). Analysis on the effect of climatic elements to the herbage yields of *Aneurolepidium chinese* in Northeast China. *Acta Botanica Sinica* (in Chinese)(植物学报), 1994, **36**(10): 790~796.

[7] French N R. Perspectives in grassland ecosystems. *Ecological Studies*, 1979, 32.

[8] Innis G S. Grassland simulation model. *Ecological Studies*, 1978, 26.

[9] Li D X(李德新), Bai Y F(白云飞). A simulation model for influence of seasonal distribution of precipitation on above ground biomass of *Aneurolepidium chinese* population. *Grassland of China*(in Chinese) (中国草地), 1996,

万方数据

(6):1～5.

[10] Hou X L(侯学良). Study on the relations between natural grassland yields and climatic elements and yields estimation of manual grassland in Ning Xia. *Journal of Natural Resources* (in Chinese)(自然资源学报), 1989, (4): 54～59.

[11] Webb W L and Lauenroth W K, *et al*. Primary production and abiotic control in forests, grassland, and desert ecosystems in the United Stated. *Ecology*, 1993, **64**:134～151.

[12] Li X L(李希来), Zhang J(张静). Effects of climatic factors on herbage yields in Tiebujia region, China. *Acta Prataculture Sinica*(in Chinese)(草业学报), 1996, **5**(2):24～29.

[13] Xu P (许鹏), Li J L(李建龙). Structure and formation analysis of desert rangeland complex types on northern Tianshan in China. *Acta Prataculture Sinica*(in Chinese)(草业学报), 1994, **3**(2):1～5.

[14] Chen X R(陈希孺). *Modern Regression Analysis*(in Chinese). Hefei: Anhui Education Press, 1987. 91～146, 151～173.

[15] Cheng P(成平), Li G Y(李国英). Projection pursuit——a new statistical method. *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics* (in Chinese)(应用概率统计), 1986, **2**(3):28～30.

[16] Chen Z L(陈忠琏). Mutivariate analysis with PPR method. *Mathematical Statistics and Applied Probability* (in Chinese)(数理统计与应用概率), 1986, (1):14～17.

[17] Zheng T Z(郑天泽), Gan G H(甘贵华). Review of research on PPR in recent years. *Acta Chinese Statistica Sinica*(中国统计学报), 1990, **28**(2):18～21

[18] Deng C L(邓传玲), Zheng Z G(郑祖国), Li J L(李建龙), *et al*. A new statistical method- introduction of PPR method and software. *Journal of Xinjiang Agricultural University*(in Chinese)(新疆农业大学学报), 1996, **30**(2):41～42.

[19] Huang Jingfeng(黄敬峰) and Li Jianlong(李建龙). The drought grade, type and indies in natural steppe grassland of the north slope of Tianshan. *Pratacultural Science* (in Chinese)(草业科学), 1992, **9**(2):43～46.

[20] Friedman J H and W Stuetzle. Projection pursuit regression. *J. Amer. Statist. Assor.*, 1981, **76**:817～823.

[21] Shang X G(尚新刚), Wang J H(王建华), Li J L(李建龙). An application of gray relative analysis to the evaluation of grassland quality of north part of Tianshan. *Grassland of China*(in Chinese)(中国草地), 2001, **23**(6):16～21.

[22] Yang Q Y(杨勤业), Li S C(李双成). Some themes on eco-regionalization of China. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报), 1999, **19**(5):596～601.

[23] OuYang Z Y(欧阳志云), Wang X K(王效科). Study on sensitive and distribute laws of ecological environment in China. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese)(生态学报), 2000, **20**(1):9～12.

[24] Zhang X S(张新时), Zhou G S(周广胜), Gao Q(高琼). Study of global change and terrestrical ecosystems in China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese)(地学前缘) 1997, **4**(1～2):137～143.

[25] Li J L(李建龙). The study on fencing and grazing successions on the spring-autumn pasture of Tianshan. *Pratacultural Sciente*(草业科学), 1993, **10**(5):35～40.

[26] Li J L(李建龙). The advances in RS, GIS and GPS technologies in grassland and agricultural ecological system application. *J. of Nanjing University*(in Chinese)(南京大学学报), 1999, **35**(5):435～438

[27] Li J L. Estimating grassland yields using remote sensing and GIS technologies in China. *New Zealand J. of Agricultural Research*(in Chinese)(武汉测绘大学学报), 1998, **41**(1):31～38.

[28] Li J L(李建龙). The study on RS technologies in estimating and forecasting grassland yield applications in China. *J. of Wuhan technical university of surveying and mapping*(in Chinese)(武汉测绘大学学报), 1998, **23**(2):153～158.

[29] Li J L(李建龙). *Applications of 3S technologies for estimating grassland yields in China*(in Chinese). SPIE'S First International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment and Space, 14～17

[30] Li J L. The effects of different rotational grazing intensities on the soil, grassland and sheep production in the northern Tianshan in China(I). *The international J. of ARCHIVOS DE ZOOTECNA*, 1997, **46**(4):301～310.

万方数据