

72-78

9081(10)

第15卷 第1期
1995年3月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 15, No. 1
Mar., 1995

蒲洼农业生态系统能流的 稳定性及其动态*

徐明**

潘向丽

(北京气象局农气中心, 北京, 100081) (广西南宁市郊区林业局, 南宁, 530001)

S181

A

摘 要 在研究生态系统结构及功能的基础上, 本文基于 1975—1990 年的数据, 对蒲洼农业生态系统能流的稳定性及其动态进行了分析。通过建立能流模型, 由李雅普诺夫稳定性原理, 得出该生态系统能流的平稳态具有渐近稳定性。动态数学模拟表明, 目前该系统的能量流动正从不稳定状态向稳定和平衡态过渡, 这一过程大约需要 7a 时间。

关键词: 生态系统, 能流, 稳定性, 动态。

生态学, 农业生态学

能量是驱动生态系统运转的动力, 研究生态系统能流的稳定性是研究整个生态系统稳定性的基础。利用分室模型研究自然生态系统的能流过程, 曾有许多成功的先例, 但用于人工生态系统的报道较为鲜见。本文把人作为生态系统的组成部分, 把太阳能(传递能)和人工辅助能区分开来输入系统, 应用分室模型, 取得了比较满意的结果。

1 蒲洼生态系统概况

蒲洼生态系统(即蒲洼小流域), 位于北京市西南石灰岩山区, 总面积 40.5 km²。该系统内山高坡陡, 相对高差达 1380m(最低点海拔 470m, 最高点海拔 1850m), 沟壑密度为 2.1 km/km², 坡度大于 25°的面积占总面积的 87.6%, 土壤厚度小于 30cm 的面积占总面积的 53.7%。该系统内植被遭受破坏严重, 森林覆被率只有 16.9%, 海拔 800m 以下为次生灌木林, 阴坡以鹅耳枥为主, 阳坡以荆条为主; 海拔 800m 以上有少量的天然次生林及油松、华北落叶松人工林。该系统内的畜牧业以绒山羊、猪、鸡为主, 多靠家庭户养, 但由于缺乏科学饲养技术, 经济效益较低。陡峭的地形条件和人类活动的长期破坏是造成该生态系统环境恶化、自然灾害频繁、水土流失严重的主要原因, 全系统年土壤流失量为 36637t, 平均侵蚀模数达 905t/km²·a。据 1990 年统计, 系统内总人口 3668 人, 耕地总面积 144hm², 人均 0.04hm², 人均口粮 96kg, 人均收入 714.5 元, 目前仍然是北京市最贫困的地区之一。

在研究生态系统结构和功能的过程中, 发现目前该生态系统内物种单调, 多样性指数较

* 本文是北京市“八五”重点课题——“北京市西南山区小流域综合治理示范区研究”的内容之一, 在研究过程中曾得到北京市水利所、北京林业大学、北京市农林科学院畜牧所、房山区畜牧局、蒲洼乡政府等单位的大力支持, 在此深致谢意。

** 现在美国密歇根理工大学学习。

收稿日期 1993 05 24, 修改稿收到日期: 1994 05 20。

低;农、林、牧之间发展不协调,结构不合理。第一性生产非常薄弱,全系统的光能利用率只有 0.096%,农田子系统的光能利用率也只有 0.26%。第二性生产的效率虽然不高,但其规模过大,远超过第一性生产的承载能力。牲畜超载引起草场退化,导致水土流失加剧,使系统进入恶性循环的圈套。

2 蒲洼生态系统能流的稳定性分析

2.1 建立能流模型

2.2.1 建立能流分室模型 生态系统的结构决定其功能,进而又影响系统的稳定性,因此研究生态系统能流的稳定性,首先要弄清系统的结构和功能。在研究生态系统结构和功能的基础上,把同化过程作为系统内的状态,建立该系统能量流动的分室模型(见图 1)⁽¹⁻⁵⁾。

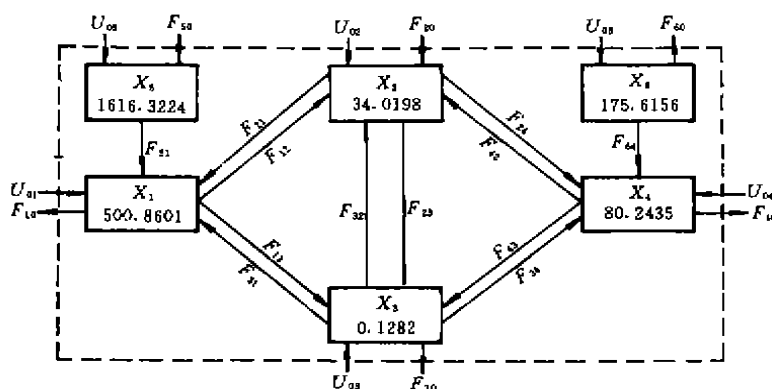


图 1 蒲洼生态系统能量流动的分室模型(单位: 10^{11} J/a)

Fig. 1 The compartment model of energy flow of Pu-wa ecosystem

2.1.2 建立能流数学模型 根据 16a(1975—1990 年)的统计与调查资料,把各分室的能量转移量(F_{ij} ,第 i 分室转移到第 j 分室或转移到环境的量)与各分室的状态(X_i)进行回归,得到下面一组回归方程:

$$F_{ij} = a_i + b_i X_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; \quad j = 0, 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

(1)式中各回归方程的相关系数 $R \geq 0.8762$,且都通过了 F 检验。把分室模型转化为数学模型,根据(1)式计算各分室之间以及各分室与环境之间的能量转移速率:

$$r_{ij} = \frac{F_{ij}}{x_i} = \frac{a_i}{x_i} + b \quad (2)$$

其中 $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; j = 0, 1, 2, 3, 4; 0$ 代表环境。这样就得到该系统的能流数学模型(10^{11} J/a):

$$\frac{dx_i}{dt} = U_{0i} - \sum_{j=0}^4 r_{ij} X_i + \sum_{j=0}^4 r_{ji} X_j \quad (3)$$

其中 $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; 且 $i \neq j$ 。

用矩阵表示为:

$$\frac{dx(t)}{dt} = FX(t) + HU(t) \quad (4)$$

其中:

$$\text{输入向量 } U(t) = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \\ U_4(t) \\ U_5(t) \\ U_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2801 \\ 174.5782 \\ 60.7429 \\ 4.4123 \\ 1913204.894 \\ 68020.3458 \end{bmatrix}$$

$$\text{系数矩阵 } F = \begin{bmatrix} -2.2950 & 0.8236 & 44.4553 & 0 & 1 & 0 \\ 1.0628 & -22.2907 & 78.5235 & 0.9392 & 0 & 0 \\ 0.0060 & 0.7964 & -1020.8389 & 0.5001 & 0 & 0 \\ 0 & 3.5797 & 124.9393 & -2.9607 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1183.6778 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -387.3252 \end{bmatrix}$$

$$\text{状态向量 } X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix}$$

$$\text{单位矩阵 } H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 求该系统能流的平衡解

生态系统能量流动过程的平衡态,在数学上意味着微商取零^[1,5,6],即

$$\frac{dx_i}{dt} = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (5)$$

由方程(5)知,生态系统能流的平衡态是不依赖于时间(t)的状态函数,对于所有的 t, x_i 均保持不变,平衡态相当于系统的常数解,即

$$FX(t) + HU(t) = 0 \quad (6)$$

在计算机上对方程(6)求解,得到该系统能流的平衡解(单位: 10^{11}J/a):

$$X_{ei} = \begin{bmatrix} x_{e1} \\ x_{e2} \\ x_{e3} \\ x_{e4} \\ x_{e5} \\ x_{e6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 724.8981 \\ 48.2824 \\ 0.1632 \\ 126.0685 \\ 1616.3224 \\ 175.6156 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

2.3 蒲洼农业生态系统能流的稳定性

由系统矩阵(F)构造特征方程如下:

$$|F - \lambda H| = 0 \quad (7)$$

在计算机上对特征方程(7)求解,得其特征根为:

$$\lambda_i = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \\ \lambda_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.2505 \\ -22.4305 \\ -1020.984 \\ -2.7201 \\ -1183.678 \\ -387.3252 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

显然,特征方程的所有特征根均具有负实部,根据李雅普诺夫稳定性原理,该生态系统能量流动的平衡态是渐近稳定的,这是由该系统特征根的性质所决定的。但对于人工生态系统来说,这种平衡态并不是人们追求的最终目标。为了使生态系统向着有利于人类的方向发展,为人类谋求更大的利益,人们必然采取各种措施对生态系统进行干预,例如小流域综合治理所采取的各种生物和工程措施、对农林牧结构所进行的调整等,都会打破这种平衡态,使系统远离其原来的平衡态,在新的状态下建立起新的平衡。因此,本文所讨论的平衡态及其稳定性只是治理前的状况,即假定不治理的情况下,该系统将来的发展趋势。治理后系统必然向新的平衡态发展,只有把治理前作为对照,才能正确评价治理后系统的平衡态及其稳定性,进而衡量小流域综合治理的成效。

3 蒲洼农业生态系统的能流动态

在人工生态系统中,外界输入给初级生产过程的能量除太阳能(传递能)外,常包含人工辅助能,但二者存在质的差别。太阳能是输入能中最低级的能量形态,而人工辅助能往往是初级产品(或其加工产品)能,是高一级的能量形式。通常情况下,太阳能要比人工辅助能高出至少3个数量级。若二者同时输入某一状态,在构造分室模型时就会把二者迭加,作为一项输入,这样就掩盖了辅助能的真正作用,无法分析人工辅助能的效应。同时由于太阳能的耗散量(输出量)也较其它状态间的转移量高好几个数量级,这样又会造成模型的急剧收敛,使模拟结果高度失真。

本文把太阳能进入系统后的同化过程作为一个虚拟“状态”,因为同化能和辅助能基本上属于同一级的能量形态,这样就把太阳能(传递能)与人工辅助能区分开来,避免了上述问题。

3.1 系统状态随时间的响应

把目前该系统的状态作为初始值代入模型(3)进行动态模拟,结果发现目前该系统内各分

室的状态都偏离其平衡态,处于不稳定的非平衡态,但随着时间的推移(大约 6—8 年),各分室的状态轨迹逐渐趋于平衡态,并最终收敛于平衡态(见图 2,3,4,5)。由于分室 5(X_5)和分室 6(X_6)为虚拟状态,其收敛过程非常快,接近于常数,这里略去其动态变化过程。

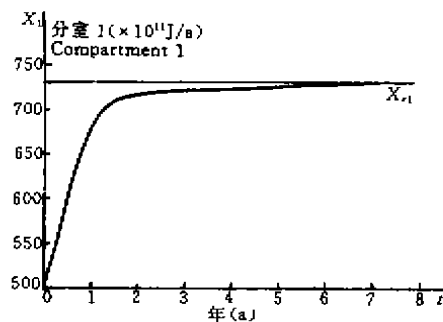


图 2 分室 1(X_1)的收敛曲线

Fig. 2 The converging curve of compartment 1

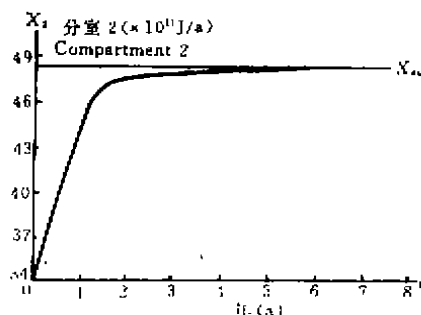


图 3 分室 2(X_2)的收敛曲线

Fig. 3 The converging curve of compartment 2

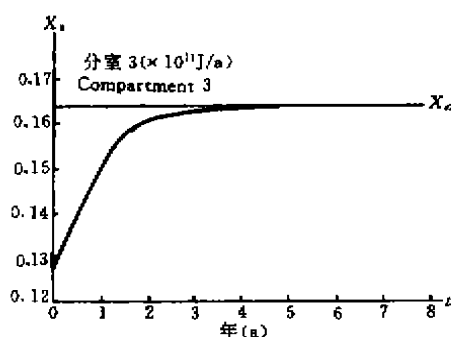


图 4 分室 3(X_3)的收敛曲线

Fig. 3 The converging curve of compartment 3

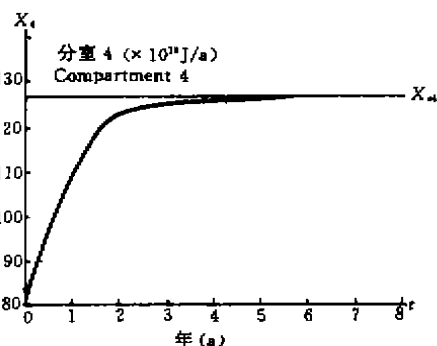


图 5 分室 4(X_4)的收敛曲线

Fig. 5 The converging curve of compartment 4

为模拟系统的动态和分析畜牧业(X_2)输入能对系统动态的影响,把 U_{02} 分为两个水平: A. 保持目前的输入水平; B. 把目前的输入值减半,其它输入向量保持目前的值不变,在计算机上对模型(3)进行动态模拟,其结果见表 1。

从表 1 可以看出,该系统的收敛速度较快,大约需要 6—8a 达到平衡,在 U_{02} 的两种输入水平下,该系统能流的趋稳过程是基本一致的。 U_{02} 的两种输入水平对各分室的状态所造成的差异不大, B 水平下 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的平衡值分别比 A 水平下降 0.23%、8.78%、3.65%、4.27%。可见,降低该系统目前畜牧业的人工辅助能投入,对系统的平衡态不会产生太大的影响。

3.2 系统外输入对系统平衡态的影响

为了分析某输入项对系统平衡态的影响,把目前的输入值(U_{0i})加倍或减半,代入模型(3)反复模拟,其结果见表 2。

表 1 各分室的状态随时间的反应

Table 1 Response to time of the state of each compartment (1990 as the beginning, unit, 10^{11} J/a)

时间 Time (a)	分室 1(X_1)		分室 2(X_2)		分室 3(X_3)		分室 4(X_4)	
	A	B	A	B	A	B	A	B
0	500.8601	500.8601	34.0198	34.0198	0.1282	0.1282	80.2435	80.2435
1	647.3315	645.9187	43.1752	38.9670	0.1487	0.1430	105.7001	100.7564
2	716.5607	714.9514	47.7114	43.4728	0.1614	0.1554	123.4358	118.0888
3	724.0011	722.3667	48.2196	43.9782	0.1630	0.1570	125.7561	120.3790
4	724.7995	723.1651	48.2757	44.0338	0.1631	0.1571	126.0329	120.6536
5	724.8872	723.2487	48.2815	44.0401	0.1632	0.1572	126.0646	120.6850
6	724.8956	723.2612	48.2823	44.0405	0.1632	0.1572	126.0680	120.6883
7	724.8998	723.2612	48.2823	44.0409	0.1632	0.1572	126.0684	120.6887
8	724.8998	723.1612	48.2823	44.0409	0.1632	0.1572	126.0684	120.6887

表 2 系统外输入对系统平衡态的影响

Table 2 The effects of input on the balance state of the ecosystem (10^{11} J/a)

输入项 Input	分室 1(X_1)	分室 2(X_2)	分室 3(X_3)	分室 4(X_4)
U_{01} 不变	724.8998	48.2823	0.1632	126.0684
$U_{01} \times 2$	725.0210	48.2886	0.1632	126.0763
$U_{02} \times 2$	728.1727	56.7657	0.1751	136.8281
$U_{03} \times 2$	726.2332	48.6920	0.2245	129.1524
$U_{04} \times 2$	724.9416	48.3555	0.1640	127.6827
$U_{01} \times 2, U_{04} \times 2$	1445.0176	87.5923	0.2522	236.6712
$U_{01}/2$	724.8371	48.2794	0.1632	126.0646
$U_{02}/2$	723.2612	44.0409	0.1572	120.6887
$U_{03}/2$	724.2310	48.0775	0.1325	124.5264
$U_{04}/2$	724.8789	48.2460	0.1627	125.2612

从表 2 可以看出,当外界输入加倍时,各分室平衡态的值都有所增加;当外界输入减半时,各分室平衡态的值都有所降低。在农田子系统的人工辅助能中,系统内输入(有机肥、劳力等)占的比例较大,而系统外输入的比例很小,故当 U_{01} 加倍时, X_1 的平衡态只增加了 1.28%。可见,目前农田子系统对系统外辅助能的依赖程度较低,处于较封闭的原始农业状态。今后应重视系统外的辅助能(化肥、农药、种子、塑料薄膜等)投入,以提高粮食产量。当 U_{02} 和 U_{03} 加倍(即相当于林果业和农业的光能利用率都比目前提高一倍)时, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 平衡态的值将分别增加 99.31%、81.42%、54.58% 和 87.73%。可见,采取有利措施提高系统内第一性生产的效率是改善该系统的关键。

4 结论与讨论

- 4.1 保持现有的输入水平和能流速率下,目前该系统能流的平衡态具有渐近稳定性^[7-10]。
- 4.2 动态模拟表明,目前该系统远离其平衡态,处于不稳定状态,若保持目前的能流结构,不采取其它治理措施,大约需要 6—8a 达到其平衡态。但这种平衡态并不是该系统追求的目标,随着小流域综合治理措施的实施和生态系统结构的调整,这种平衡态必然会被新的平衡态所取代^[8]。
- 4.3 目前该系统处于较封闭的状态,对外界辅助能的响应不敏感。今后应该增加系统外的辅

助能投入,提高系统内的能流效率。提高森林覆被率、减少水土流失、引进优良品种等有助于提高光能利用率的措施将会使目前该系统的状况得到显著改善。

4.4 利用分室模型和李雅普诺夫稳定性原理研究自然生态系统能流的稳定性是比较成功的。但应用于人工生态系统,本文只是一种尝试,有待于进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 祖元刚. 能量生态学引论. 长春, 吉林科学技术出版社, 1990
- 2 史密斯 J M. 生态学模型. 北京, 科学出版社
- 3 吴刚等. 黄淮海平原豫北地区农林业系统的能量研究. 应用生态学报, 1994, 5(4): 355—359
- 4 陆健健. 能量生态学(六). 种群与生态系统中的能流. 生态学杂志, 1988, 7(2): 63—67
- 5 Odum H T. *Systems Ecology, An Introduction*. John Wiley and Sons Publishing House, 1983
- 6 权宏顺. 3 维 Lotka-volterra 合作系统的全局稳定性. 应用数学, 1991, 4(1): 53—57
- 7 希尔 A R. 生态系统稳定性的近期展望. 王仰麟译. 自然资源译丛, 1990(1): 41—49
- 8 侯向阳. 农业生态系统的稳定及发展. 农业现代化研究, 1989, 10(4): 24—26
- 9 何芳良. 生态系统的复杂性与稳定性. 生态学进展, 1988, 5(3): 157—162
- 10 吴刚等. 豫北地区混林农业系统综合效益的评价. 农业现代化研究, 1992, 13(3): 154—156

STABILITY AND DYNAMICS OF THE ENERGY FLOW OF THE PUWA AGRO-ECOSYSTEM

Xu ming

(Beijing Municipal Meteorological Bureau, Beijing, 100081)

Pan Xiangli

(The Coastal Forestry Bureau, Nanning, 530001)

Based on the 1975—1990 data on energy flow through an agricultural ecosystem in Puwa, located in the southwest mountain area of Beijing city, where the studies on the structure and functions of ecosystem have been carried out, the stability and dynamics of the energy flow through this ecosystem were further analyzed. By establishing a compartment model for energy flow and making a mathematically dynamic simulation based on the model, it was found that the ecosystem is presently in a state of deviating from its balance of energy flow, which has a progressive stability. The energy flow through the ecosystem is being in a transition from a labile state to a stable state of balance. Such a process will take about 7 years if the ecosystem continues to keep its present structure and energy flow at present rate. The ecosystem is now insensitive to the input from its outside.

Key words: ecosystem, energy flow, stability, dynamic status.