基于功能与空间格局的区域生态系统保育策略

郭中伟 甘雅玲

(中国科学院动物研究所农业虫害综合防治国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 本研究以位于长江流域的湖北省兴山县为研究区域,着重讨论了基于功能与空间格局的生态系统保育策略,即以改善生态系统功能为评价指标,以调整生态因子的空间格局为手段的生态系统保育策略。根据该县的地理位置,我们以生态系统功能中的水源涵养为森林生态系统保育的评价指标。利用基于地理信息系统的空间数据库,分析了研究区域内 90 类植被-土壤-坡度复合体的水涵养功能,综合评价了整个研究区域中生态系统的水涵养能力。利用生态系统中水涵养能力的空间异质性和变化-位置效应在生态因子改变中的作用,我们提出了“基于空间格局的森林扩展”的策略。将该策略应用于兴山县的生态系统保育,以期达到保育森林与改善水涵养能力的双重目的。本研究为保育、管理和持续利用长江流域和其他遭遇同样问题的区域的生态系统提供了有价值的信息。

关键词: 生态系统,保育,策略,水源涵养,变化-位置效应,空间格局

中图分类号: Q148 文献标识码: A 文章编号: 1005-0094(2002)04-0399-10

A strategy for ecosystem conservation based on function and spatial pattern

GUO Zhong-Wei, GAN Ya-Ling

State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract: Using Xingshan County of Hubei Province as a case study, we discussed a strategy for ecosystem conservation based on functions and spatial pattern. The strategy uses the improvement of ecosystem functions as appreciation indices, and the regulation of the spatial pattern of ecological factors as an approach. Here, the ecosystem function for water retention was considered as an appreciation index, due to this county's location in the watershed of the Yangtze River. The county was divided into 90 types of vegetation-soil-slope complexes. A GIS-embodied spatial database was used to explore the relationships between the capacity of water retention by a complex and the types of vegetation, soil and slope. We estimated statistically the capacity of water retention of every complex, and evaluated integrally the situation of water retention in the county. The variation-location effect describes the phenomenon that the identical variation of a factor may produce different effects on the overall situation, when this variation occurs in different spatial locations. This effect highlights the effect of the spatial patterns of biological and physical factors as well as their combinations to produce ecosystem functions. According to this effect, we can discuss spatially the quantitative variations of ecological factors and the effects of these variations on the overall ecosystem. By this means "quantity" and "space" are integrated. In this study, according to this effect, we changed the situation of water retention in the watershed by regulating the combination of vegetation, soil and slope. The strategy of "spatial pattern-based forestland extension" is based solely upon the variation-location effect. This study shows that greater benefit of water retention in the watershed can be obtained from the extension of forestland by using this strategy. Likewise, applying this strategy in the establishment of a protective forest system in the Yangtze River basin, the situation of water retention in

this basin can also be greatly improved, and people can derive more benefit from water and soil conservation. The variation-location effect is of universal significance and useful for ecosystem restoration, conservation and management. The terrestrial ecosystems in many regions are undergoing great changes, and, as consequences, ecosystem functions will be weakened. The conservation and restoration of these ecosystems will be critical problems people must face. Our research work may be an essential step to the restoration of the ecosystem functionality in these regions.

Key words: ecosystem, conservation, strategy, water retention, variation-location effect, spatial pattern

1 引言

生态系统的保育是目前公众关注的焦点。那么保育的目标如何确定?对生态系统如何实施保育?就成为生态学家应该回答的问题。确定恰当的保育目标和行之有效的保育策略对于实施生态系统保育是十分重要的。本研究所讨论的基于功能与空间格局的生态系统保育策略包括了表征生态系统保育成效的生态系统功能的选取,物理因素与生物因素及其组合的空间格局分析在生态系统保育中的应用。

本文的研究区域是位于长江流域的湖北省兴山县,该县位于湖北省西部,面积 2316 km²,其中森林面积 1070 km²。香溪河和凉台河在该县汇集了 62 条较大的溪流并注入长江,平均每年产水量 2.11 亿 m³。这里的陆地生态系统水涵养能力直接影响到香溪河和凉台河的流量,并进而影响到长江的流量。在长江中上游,水涵养是陆地生态系统最重要的功能(Li *et al.*, 1999)。该区域的生态系统在雨季截留雨水以减少长江的洪水,在旱季提供水源补充流量。长江流域地区不适当的开发已经导致生态敏感的天然森林被采伐,并且得不到良好的恢复,同时土地利用方式的改变如林地变成农田也已经成为普遍现象。这些因素已经导致长江流域水涵养能力的衰减。1998 年特大洪水造成的损失是触目惊心的。科学家已经反复强调近来南方省份森林覆盖面积的急剧减少与长江流域地区水涵养能力的减弱、水土流失的增加和更多的破坏性洪水之间的关联(Wang, 1993)。为了扭转这种局面,中国政府已经计划建立防护林系统以减少长江流域的水土流失。该项目规模之大,使其成为发展中国家实施的最大植树造林计划(World Bank, 1992; Mather, 1993)。

在本研究中,根据研究区域的地理特征和普遍的共识,我们以水涵养——即吸纳和储存降水的生态系统功能作为评价生态系统保育状况的指标。该生态系统功能提供了两类生态系统服务:即水源供

给和水量调节(Costanza *et al.*, 1997; Guo *et al.*, 2000),并且其能力与另一个重要的生态系统服务效能——土壤流失控制正相关。像整个长江流域一样,兴山县也正在实施森林生态系统的保育工程。本研究通过兴山县的研究实例,阐明了基于功能与空间格局的生态系统保育策略,为保育、管理和持续利用长江流域及其他面临同样问题的区域的生态系统提供有价值的信息。

2 研究方法

2.1 空间分析

兴山县在植被、土壤和地形上表现出较高的异质性。实验结果表明:陆地生态系统的水涵养能力与植被、土壤和地形的类型密切相关(Lee, 1980; Hewlett, 1982; 马雪华, 1993)。因而,我们建立了空间数据库来探讨植被-土壤-坡度复合体的类型与其水涵养能力之间的关系(Carver *et al.*, 1995; Cowen *et al.*, 1995; Mallawaarachchi *et al.*, 1996; Eade & Moran, 1996; Swetnam *et al.*, 1998; Bradshaw & Muler, 1998)。

兴山县植被、土壤和地形的空间数据库均依照 1:50000 的比例尺建立。植被图是利用 1995 年 9 月 15 日的 Landsat TM 图像的解读与 1997 年在兴山县实地调查相结合的方法而获得的。植被分为 6 类:即密林(DFE)、疏林(OFE)、灌丛(SHR)、草地(GRA)、果林(ORC)和农作物(CRP)。土壤分为 5 类:即黄棕壤(YBS)、黄壤(YLS)、石灰土(LMS)、紫色土(PPS)和水稻土(RCS)。在地形方面,我们将其分为坡度角小于 15°(SA < 15°)、介于 15°和 25°之间(SA = 15° ~ 25°)和大于 25°(SA > 25°)3 类。兴山县植被、土壤和地形的数字地图包含在用 ARC/INFO 软件开发的地理信息系统之中。我们利用这些地图产生了一组描述研究区域特定生态因子的专题地图。叠加这些专题地图并且整合关键地理图层,如植被(6 类)、土壤(5 类)和坡度(3 类),将

整个县划分成若干类植被-土壤-坡度复合体。每一个复合体反映了一类植被、土壤和坡度的组合。我们关注每一类植被-土壤-坡度复合体所具有的水涵养能力及其在整个研究区域所形成的水涵养能力的空间异质性。

2.2 水涵养功能的评估

本文所讨论的水涵养功能,系指一次降水后植被-土壤系统的持水量。森林生态系统涵养水源的功能可以通过雨水在森林中的流动来说明。通常雨水在森林中的流动包括3个阶段:树冠截留(L)、枯枝落叶层贮留(U)和土壤贮存(S)(马雪华,1993)。因此,森林生态系统一次降水后植被-土壤系统的持水量 WR (mm),可表示为:

$$WR = L + U + S \tag{1}$$

关于林冠和地面的蒸散,在非降水产流期间,由土壤含水量的初值来表明;在降水产流期间则把蒸散作用合并到林冠截留中,不再另行考虑(徐嵩龄,1988)。

兴山县地跨中亚热带常绿阔叶林和北亚热带常绿、落叶阔叶林两个林带。在一块坡度为15°、土壤为黄棕壤的密林中测得:类型为“DFE-YBS-SA < 15°”的地块中,树冠对降水的一次截留量为0.87 mm,枯枝落叶层最大持水量为5.97 mm,土壤含水量为101.6 mm。根据公式(1),则该地块的综合水涵养水量为108.44 mm。分别测量该区域不同植被、土壤和坡度与水涵养能力相关的数据(图1a,b,c),并利用归一法确定它们的相对水涵养能力系数(表1)。

利用不同植被、土壤和坡度类型的能力系数,以植被-土壤-坡度复合体“DFE-YBS-SA < 15°”为基准,兴山县90类植被-土壤-坡度复合体实际的持水量可以用下面的公式估计(郭中伟,李典谟,1997):

$$WR(p_i) = v_l s_j p_k WR(p_s) \tag{2}$$

这里, $WR(p_i)$ 是第 i 类复合体年涵养水源的总量 (mm/yr.)。对于一类复合体,该公式有 v_l ($l = 1, 2, \dots, 6$), s_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) 和 p_k ($k = 1, 2, 3$)。 $WR(p_s)$ 是基准复合体所涵养的水量,它可以通过公式(1)求得。例如:在土壤和坡度相同的情况下,灌丛 (SHR) 涵养的水量是密林 (DFE) 的 57% (0.57)。

表1 不同类型植被、土壤和坡度的相对水涵养能力系数
Table 1 The coefficient of relative capacity of water retention of different types of vegetation, soils and slopes in a unit of area

类型 Type	符号 Symbol	相对水涵养能力系数 Coefficient of relative capacity
DFE	v_1	1.00
OFE	v_2	0.71
SHR	v_3	0.57
GRA	v_4	0.35
ORC	v_5	0.11
CRP	v_6	0.07
YBS	s_1	1.00
YLS	s_2	0.98
LMS	s_3	0.81
PPS	s_4	0.78
RCS	s_5	0.05
SA < 15°	p_1	1.00
SA = 15° ~ 25°	p_2	0.57
SA > 25°	p_3	0.31

注 Note: DFE:密林 Dense forests; OFE:疏林 Open forests; SHR:灌丛 Shrubs; GRA:草地 Grasses; ORC:果林 Orchards; CRP:农作物 Crops; YBS:黄棕壤 Yellow brown soil; YLS:黄壤 Yellow soil; LMS:石灰土 Lime soil; PPS:紫色土 Purple soil; RCS:水稻土 Rice soil

图1 植被(a)、土壤(b)和坡度(c)持水能力的比较
Fig. 1 Comparisons of the capacities of water retention of vegetations, soils and slopes
缩写字母注释同表1。Abbreviations as in the note to Table 1

像复合体一样,一个区域的水保持能力也依赖于植被、土壤和地形的条件。水保持最佳森林覆盖率 CR 是一个评价植被状况的指数。

$$CR = \frac{P A_f}{WR A_t} \times 100\%$$

(3)

这里 P 是多年平均日最大降水量(mm)。 A_f 是研究区域中除城镇、村落、农田和水体以外的面积(hm^2)并且 A_t 是该区域的总面积(hm^2)。 WR 是该区域水保持的能力(m^3/hm^2)。

在任何地块内,复合体的特性(如植被、土壤和地形的类型等)决定了该地块的生态系统功能的强度。一个地块具有特定的复合体类型,并且每一类复合体具有特定的水涵养能力。因此,地块的空间位置能够表明复合体的位置,并且也表明了各种水涵养能力的位置。我们可以根据地块的属性(复合体类型)和空间位置来确定研究区域内水涵养能力的空间分布。

2.3 变化 - 位置效应及其评价

在一个复合体内,植被的改变可以导致水涵养功能的变化。例如根据调查,复合体 GRA-RCS-SA > 25°具有 2.64 mm 的水涵养能力,而复合体 GRA-YBS-SA < 15°为 18.43 mm。如果这两类复合体的植被类型都改变成密林(DFE),它们的水涵养能力将分别增加到 15.71 和 108.44 mm。兴山县 1 次降水的平均降水量为 25.58 mm,多年平均日最大降水量为 86.4 mm。那么从 2.64 mm 增至 15.71 mm 为前一个复合体的水涵养能力提供了更多的潜在“有效增量”,而从 18.43 mm 增至 108.44 mm 仅仅是为后一个复合体的水涵养能力添加了更多的冗余能力,因为 108.44 mm 已经超出日最大降水量 20%。

植被类型在两个复合体内的同一变化产生了不同的水涵养效果,其原因是这两个变化发生在具有不同的物理属性(土壤和坡度类型)的空间位置上。这就是说:当一个因子的同一变化(定性或定量)发生在不同的空间位置时,可以对全局产生不同的效应。我们称这种现象为“变化 - 位置(variation-location)效应”。那么,在第 i 类复合体内,当具有相对水涵养能力 v_l 的植被被另一个具有相对水涵养能力 v_m 的植被取代时,变化 - 位置效应就可能发生在该复合体水涵养能力的变化上。我们用指数 W_{si} 来评价这种变化 - 位置效应。

$$W_{si} = \frac{(v_m - v_l) \sum_j \lambda_j rw_j}{k WR_i}$$

(4)

这里 k 是各类降水量的数量, λ_j 是第 j 类降雨的权重系数, rw_j 是第 j 类降雨中的降水强度。较大的指数值表明:当植被类型改变时,较大的变化 - 位置效应可能发生在该复合体水涵养能力的变化上。换句话说,这个复合体能够通过植被类型的改变获得较大的水涵养能力的有效增量。在本研究中,我们利用该指数所表明的变化 - 位置效应来调整植被的空间格局,以实现改善区域水涵养能力的目标。

3 结果与讨论

3.1 研究区域的特征

利用地理信息系统的工具,研究区域被划分为 90 类植被 - 土壤 - 坡度复合体,由此得到了 6184 个地块。每一个地块由 6 类植被类型、5 类土壤类型和 3 类坡度类型中的各一类的组合所表示。用此方法我们可以获得各类复合体的面积(表 2)。每一个地块表示了物理和生物属性,如土壤、坡度和植被的独特组合。这说明了植被、土壤和坡度类型与一个复合体之间的关系。通过这些地块的空间格局可以标定水涵养能力的空间分布。

3.2 生态系统的水涵养能力

在本研究中,我们分别评估了 90 类植被 - 土壤 - 坡度复合体水涵养能力和研究区域整体的水涵养能力。应用公式(1)和(2),评估了每一类复合体的水涵养能力。在对所有复合体评估的基础上,应用公式(3)评估了研究区域整体的水涵养能力。

3.2.1 复合体水涵养能力及其空间分布

这里,我们利用公式(1)(参数见表 3)估计了 90 类植被 - 土壤 - 坡度复合体的水涵养能力(图 2)。我们实地测量了研究区域内 20 类复合体的实际水涵养能力并且将其与公式(1)的模拟结果相比较(图 3)。比较结果表明:利用公式(1)估计的结果较好地与观察数据相拟合。利用公式(2)(复合体面积见表 2),估计了每一类复合体涵养水量的能力。图 4 显示了研究区域内各类水涵养能力的面积份额。

3.2.2 区域整体水涵养能力

区域整体水涵养能力取决于所有地块的相应能力。根据上面的讨论,仅有大约占总面积 28.6 % 的

表 2 90 类植被－土壤－坡度复合体及其面积
Table 2 Areas of ninety types of vegetation-soil-slope complex (km²)

代码 Code	土壤－坡度 Soil-Slope	DFE	OFE	SHR	GRA	ORC	CRP
T ₁	YBS-SA < 15°	2.406	58.165	44.527	8.193	0.390	0.266
T ₂	YBS-SA = 15° ~ 25°	16.35	275.59	347.21	73.39	8.260	6.989
T ₃	YBS-SA > 25°	0.694	48.010	91.601	22.93	9.290	0.748
T ₄	YLS-SA < 15°	0.282	6.140	8.395	2.768	0.187	0.719
T ₅	YLS-SA = 15° ~ 25°	0.917	24.355	35.395	15.47	3.460	3.845
T ₆	YLS-SA > 25°	0.073	3.270	4.063	3.934	3.698	1.279
T ₇	LMS-SA < 15°	9.487	122.83	80.802	23.54	0.400	0.769
T ₈	LMS-SA = 15° ~ 25°	16.48	247.28	220.38	55.49	3.405	4.090
T ₉	LMS-SA > 25°	2.307	16.847	26.612	12.37	1.495	0.624
T ₁₀	PPS-SA < 15°	0.890	9.860	12.376	5.345	0.703	0.907
T ₁₁	PPS-SA = 15° ~ 25°	0.211	20.703	51.541	22.32	2.700	5.071
T ₁₂	PPS-SA > 25°	0	2.547	8.487	6.027	2.734	2.352
T ₁₃	RCS-SA < 15°	0.090	1.926	30.097	1.316	0.063	0.124
T ₁₄	RCS-SA = 15° ~ 25°	0.328	14.139	19.822	8.245	2.896	2.309
T ₁₅	RCS-SA > 25°	0.065	3.488	8.576	4.648	4.244	1.387

注：缩写字母注释同表 1。Note :Abbreviation as in the note to Table 1

表 3 评估模型中的参数
Table 3 Description of the parameters in the assessment models

参数 Parameter	描述 Description	数值 Value
W	基准水涵养能力(mm) Standard water retention capacity	108.23
λ_1	1 类降水权重系数 Weight coefficient of the first type of precipitation	0.19
λ_2	2 类降水权重系数 Weight coefficient of the second type of precipitation	0.31
λ_3	3 类降水权重系数 Weight coefficient of the third type of precipitation	0.3
λ_4	4 类降水权重系数 Weight coefficient of the forth type of precipitation	0.2
rw_1	1 类降水的降水强度(mm/min) Intensity of the first type of precipitation	0.04
rw_2	2 类降水的降水强度(mm/min) Intensity of the second type of precipitation	0.12
rw_3	3 类降水的降水强度(mm/min) Intensity of the third type of precipitation	0.25
rw_4	4 类降水的降水强度(mm/min) Intensity of the forth type of precipitation	0.33
N	复合体数量 Amount of complex	45
K	降水类型数量 Number of precipitation type	4

少数地块具有大于一次降水平均降水量 25.58 mm 的持水能力,其他的均低于该值。这表明兴山县整体水涵养能力是相当差的。兴山县多年平均日最大降水量是 864 m³/hm²,森林水保持能力为 1090 m³/hm²。该县的总面积和除城镇、村落、农田和水体以外的面积分别为 2316 和 2219.6 km²。那么根据公式(3),该县水保持最佳森林覆盖率应该为64.9%。

但是目前实际的森林覆盖率为 39.1% ,并且这些森林的郁闭度多数为 0.3。这个结果说明 :以改善水涵养生态系统功能作为评价生态系统保育状况的指标对于兴山县也具有重要的现实意义。

我们比较了 4 种天然植被 ,密林(DFE)、疏林(OFE)、灌丛(SHR)和草地(GRA)在 15 类土壤－坡度组合(表 2 中的 T₁ ~ T₁₅)中的面积 ,这包含了 60 类植被－土壤－坡度复合体(图 4)。密林(DFE)在每一类组合中所占面积份额是 4 种天然植被中最小的 ,均小于 10%。密林(DFE)的总面积仅约占全县面积的 1.91% ;而疏林(OFE)、灌丛(SHR)和草地(GRA)的面积份额分别为 31.8%、48.89% 和 17.7%。这说明密林(DFE)无论是在区域内的绝对面积 ,还是在每一类土壤－坡度组合中的相对面积都过小。

就土壤和坡度而言 ,具有最大持水能力的黄棕壤(YBS)的面积占全县的 45.17% ,而具有最小持水能力的水稻土(RCS)的面积仅占 4.64%。另外 ,坡度介于 15°和 25°之间(SA = 15° ~ 25°)的面积占全县的 60% 以上 ,坡度小于 15°(SA < 15°)的面积大约是坡度大于 25°(SA > 25°)的 1.2 倍。因此 ,研究区域内的土壤和地形是较有利于水涵养的 ,只是植被的不良状况才导致研究区域中水涵养能力的严重不足。

3.3 生态系统的保育策略

前面通过对水涵养生态系统功能的评价 ,揭示了兴山县生态系统的现状。这里我们将以水涵养生

图 2 90 类植被 - 土壤 - 坡度复合体的饱和持水量
Fig. 2 Saturated water retention capacity of ninety types complex of vegetation-soil-slope

图 3 持水量实测值与估计值的比较
Fig. 3 Comparison between the observed and estimated water retention capacity

图 4 4 种植被 DFE , OFE , SHR 和 GRA 在每一类土壤 - 坡度组合中的面积份额
Fig. 4 Share of area for four types vegetation , DFE , OFE , SHR and GRA in every soil-slope combination
缩写字母注释同表 1。Abbreviation as in the note to Table 1

态系统功能为指标 , 讨论生态系统的保育策略。森林生态系统保育的最基本、也是最主要的手段是扩展林地面积 , 即在一些区域通过植树造林以密林来替代疏林、灌丛和草地。那么如何通过有限的面积扩展来获得最大的生态系统服务效能(如水涵养) 的改善 , 就成为森林生态系统保育的首要目标。

根据公式(4)(参数见表3),我们得到了一组指数(1~0.001)来评价在包含疏林(OFE)、灌丛(SHR)和草地(GRA)的45类复合体内植树的变化-位置效应。这些指数随复合体水涵养能力的减弱而增加,这表明:具有较小指数的复合体仅能获得较少的水涵养能力的有效增量。根据这些指数,我们可以确定哪一类复合体能够通过植树获得水涵养能力的较大有效增量。例如,复合体OFE-RCS-SA>25°和GRA-RCS-SA>25°分别具有指数值0.0031和1,若通过植树将它们转变成DFE-RCS-SA>25°,相应的地块将获得水涵养能力的增量分别为4.06和13.08mm。这意味着通过植树,具有较大指数的后一个复合体能够比前一个获得更多的有效增量。

根据水土保持林的建设规划,在未来30~40年里,三峡流域的森林面积将增加200万hm²,是现有面积的53.19%(林业部,1995)。依照这个比例,兴山县的森林面积将增加5.7万hm²。为了获得最大水涵养的利益,我们建议在具有较大的变化-位置效应指数的地块中建设水土保持林。换句话说,我们应当优先利用那些能够获得较大的水涵养能力增量的地块,我们称其为“基于空间格局的森林扩展”策略。通过这种方式,该县的水涵养能力可以得到最大限度的改善。该策略特别关注森林扩展中的变化-位置效应。根据变化-位置效应指数的大小,将45类包含疏林(OFE)、灌丛(SHR)和草地(GRA)的复合体排成植树候选序列。序列中具有较大指数的复合体将被优先用于森林建设,直到被选中的复合体的总面积达到5.7万hm²。表4给出了被选中的23类复合体。这些复合体的植被类型将被改变成密林(DFE)。图5比较了植被改变前后这些复合体的水涵养能力。植树后,密林(DFE)的面积在T₈~T₁₅中所占份额将超过50%(见图6),并且水涵养能力将超过25.58mm(一次降水的平均降水量)的复合体的数量将增加75%。包含4种天然植被的地块的平均水涵养能力将增加大约10mm。结果,该县将获得最大的水涵养能力有效增量。图7显示了目前和改善后的各类水涵养能力的空间格局。

4 讨论与结论

在本研究中,我们利用地理信息系统软件ARC/INFO,生成了研究区域的数字文件,形成了

表4 植树候选复合体
Table 4 Waiting list of complex for afforestation

序列 Sequence	指数 Index	复合体类型 Types of complex	面积 Area (hm ²)
1	1.000	GRA-RCS-SA > 25°	465
2	0.611	GRA-RCS-SA = 15° ~ 25°	825
3	0.462	GRA-PPS-SA > 25°	603
4	0.330	GRA-RCS-SA < 15°	132
5	0.323	SHR-RCS-SA > 25°	858
6	0.282	GRA-PPS-SA = 15° ~ 25°	2232
7	0.197	SHR-RCS-SA = 15° ~ 25°	1982
8	0.195	GRA-LMS-SA > 25°	1237
9	0.152	GRA-PPS-SA < 15°	535
10	0.149	SHR-PPS-SA > 25°	849
11	0.143	GRA-YLS-SA > 25°	393
12	0.119	GRA-LMS-SA = 15° ~ 25°	5549
13	0.106	SHR-RCS-SA < 15°	3009
14	0.092	GRA-YBS-SA > 25°	2293
15	0.091	SHR-PPS-SA = 15° ~ 25°	5154
16	0.087	GRA-YLS-SA = 15° ~ 25°	1547
17	0.064	GRA-LMS-SA < 15°	2354
18	0.063	SHR-LMS-SA > 25°	2661
19	0.056	GRA-YBS-SA = 15° ~ 25°	7339
20	0.049	SHR-PPS-SA < 15°	1238
21	0.047	GRA-LS-SA < 15°	277
22	0.046	SHR-YLS-SA > 25°	406
23	0.038	SHR-LMS-SA = 15° ~ 25°	22 038

注:缩写字母注释同表1。Note:Abbreviation as in the note to Table 1

“数字生态系统”,并利用它将该区域划分为90类植被-土壤-坡度复合体。一个复合体表示了植被、土壤和坡度的一种组合,并因此表明了不同的水涵养能力。因而植被、土壤和坡度类型可以作为估计复合体水涵养能力模型的输入。地理信息系统的一个数据层关联到评估模型的一组输入,通过这种方法两者被结合。所以,我们可以根据植被、土壤和坡度的类型,逐个评估复合体的水涵养能力并且在地图上标注它们的空间分布。

我们认为生态系统的保育应该有明确的评价指标。以恢复某一(些)种生态系统服务的功能作为保育评价指标是符合当前社会、环境和经济发展水平的,也是可操作的。尽管这看起来或多或少地反映了“以人类为中心的”的思想,但是这样做对于维护人类生存是必要的,并且也易于被公众和政府所接受,这对于生态系统保育的成功与否是十分重要的。因此,在确保生态效益的同时兼顾社会效益应该是生态系统保育所遵循的基本原则之一。各种类型的生态系统为人类社会提供了各种各样的生态服务,例如大气调节、水量调节、水源供给等。生态系

图5 目前(a)和改善后(b)的各类复合体的水涵养能力
Fig.5 Water retention capacities of the various complexes in current status (a) and after improvement (b)
缩写字母注释同表1。Abbreviation as in the note to Table 1

图6 植树后4种植被 DFE ,OFE ,SHR 和 GRA 在每一类土壤 - 坡度组合中的面积份额
Fig.6 Share of area for four types vegetation ,DFE ,OFE ,SHR and GRA in every soil-slope combination after afforestation
缩写字母注释同表1。Abbreviation as in the note to Table 1

统服务体现了人类直接或间接从生态系统功能获取的利益(Costanza *et al.* 1997 ;Guo *et al.* 2001)。单一的生态系统服务可能是两种或更多的生态系统功能的产品,而单一的生态系统功能也可能提供两个或更多的生态系统服务。生态系统服务与生态系统

功能是紧密相关的,并且生态系统功能广泛关联到栖息地的生物学特性和生态系统的过程。生态系统服务的效能能够表征生态系统功能的状况,并进而反映生态系统总体状况。生态系统功能还是相互关联的:一个异龄复层,针阔混交林生态系统具有良好

图7 目前(a)和改善后(b)的各类水涵养能力的空间格局
Fig.7 Spatial pattern of water retention capacities in current status (a) and after improvement (b)

的水涵养功能(马雪华, 1993), 并且它也同样具有良好的蕴藏生物多样性的功能。因此, 通过一个(或几个)重要的生态系统服务的效能来评价生态系统保育的成效是合理的。实际上, 生态系统服务的效能是依赖于生物因素(如植被类型等)与物理因素(如土壤和地形等)的相互组合, 如在土壤和植被类型相同的条件下, 坡度较小的林地能够比坡度较大的涵养更多的水量。由于诸多物理因素和生物因素在空间上的异质性, 生态系统功能和生态系统

服务的效能同样具有空间异质性。通过改变一个(或几个)生物和物理因素可以改变生态系统服务的效能(在大的空间尺度上, 人们往往是通过改变生物因素, 如植树造林来实现这一目的, 而不是试图改变地形或土壤类型)。因此, 生态系统保育就不可避免地涉及到空间格局问题, 如植被、土壤和地形及其组合的空间格局等。基于功能与空间格局的生态系统保育策略以改善生态系统功能为评价指标, 以调整生态因子空间格局为手段, 以兼顾生态和社

会两重利益为目标。在扩大森林面积的同时,充分利用林地空间格局对有关生态效能的影响,求得有限面积扩展下的最大效益。这个格局常常与植被、土壤和坡度的组合将关联。本研究中所讨论的变化-位置效应揭示了这种影响。根据这种效应,我们可以通过调整植被、土壤和坡度的组合来改变水涵养的状况。“基于空间格局的森林扩展”策略就是利用了这种效应,并且通过本研究证明:水涵养的最大效益能够从依据该策略的森林扩展中获得。同样,在建立长江流域防护林体系中运用这个策略,水涵养的状况也能够得到最大限度的改善,并且人们可以获得更多的水土涵养的利益。变化-位置效应具有广泛的意义,可以应用到生态系统的恢复、保育和管理中。

长江流域中的生态系统正在经历着大的改变,其结果是水涵养的生态功能正在减弱(Yin,1998)。这些生态系统的保育和恢复将是人们必须面对的重大问题。我们的研究对于在机能上恢复这些生态系统将是有意义的一步。

参考文献

马雪华,1993. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社
林业部,1995. 中国 21 世纪议程——林业行动计划. 北京: 中国林业出版社
郭中伟,李典谟,1997. 生态系统调节水量的价值评估——兴山实例. 自然资源学报, **13**(4):31~37.
徐嵩龄,1988. 森林-水资源系统的理论分析. 自然资源学报, **3**(4):335~347
Bradshaw T K and B Muller, 1998. Impacts of rapid urban growth on farmland conversion: application of new regional land use policy models and geographical information systems. *Rural Sociology*, **63**: 1~25.
Carver S, I Heywood, S Cornelius and D Sear, 1995. Evaluating field-based GIS for environmental characterization, modelling and decision-support. *International Journal of Geographic Information System*, **9**: 475~486

Costanza R, R d'Arge, R Groot, S Farber, M Grasso, B Hsimulationon, K Limburg, S Naem, R V O'Neill, J Paruelo, R G Raskin, P Sutton and M Belt, 1997. The value of the worlds ecosystem services and natural capital. *Nature*, **387**: 253~260
Cowen D J, J R Jenson, P J Bresnahan, G B Ehler, D Graves, X Huang, C Wiesner and H E Mackey, 1995. The design and implementation of an integrated Geographic Information System for environmental applications. *Photogra Metric Engineering and Remote Sensing*, **61**:1393~1404.
Eade J D O and D Moran, 1996. Spatial economic valuation: benefits transfer using geographical information systems. *Journal of Environmental Management*, **48**:97~110
Guo Z, X Xiao and D Li, 2000. An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications*, **10**: 925~936
Guo Z, X Xiao, Y Gan and Y Zheng, 2001. Ecosystem functions, services and their values—a case study in Xingshan County of China. *Ecological Economics*, **139**:141~154.
Hewlett J D, 1982. Principles of Forest Hydrology. University of Georgia Press, Athens, GA
Lee R, 1980. Forest Hydrology. Columbia University Press, New York
Li C, J Koskela and O Luukkanen, 1999. Protective forest systems in China: current status, problems and perspectives. *Ambio*, **28**: 342~245
Mallawaarachchi T, P A Walker, M D Young, R E Smyth and H S Lynch, 1996. GIS-based integrated modelling systems for natural resource management. *Agricultural System*, **50**: 169~189
Mather A S, 1993. Afforestation Policies Planning and Practice, Belhaven Press, London, England
Swetnam R D, J O Mountford, A C Armstrong, D T G Gowing, N J Brown, S J Manchester and J R Treweek, 1998. Spatial relationships between site hydrology and the occurrence of grassland of conservation importance: a risk assessment with GIS. *Journal of Environmental Management*, **54**: 189~203
Wang G, 1993. On water and soil conservation. *Ecological Economics Newsletter*, May, 7~12
World Bank, 1992. China Environmental Strategy Paper, World Bank Publication, Washington DC
Yin R, 1998. Forestry and the environment in China: the current situation and strategic choices. *World Development*, **26**: 2153~2167

(责任审稿人:徐嵩龄;责任编辑:闫文杰,孙大川)