

海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值评估

肖 寒¹, 欧阳志云¹, 赵景柱¹, 王效科¹, 韩艺师²

(1. 中国科学院生态环境研究中心 北京 100080 2. 海南省资源环境厅, 海南 570204)

摘要 在地理信息系统的支持下, 采用通用土壤流失方程(USLE)及其修改式估算了海南岛现实土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量, 得到了海南岛生态系统土壤保持的空间分布特征, 研究表明 中部山区的生态系统的土壤保持能力较其它地区大, 全岛年土壤保持总量为 1.58×10^7 t, 并利用市场价值法, 机会成本法和影子工程法评价了各类型生态系统的土壤保持价值。海南岛年土壤保持总价值为 7492.41 万元, 其中减少土地废弃价值为 49.37 万元, 保护土壤肥力价值为 7274.22 万元, 减轻泥沙淤积价值为 168.82 万元。

关键词 土壤侵蚀 土壤保持 生态价值 地理信息系统 通用土壤流失方程 海南岛

The spatial distribution characteristics and eco-economic value of soil conservation service of ecosystems in Hainan Island by GIS

XIAO Han¹, OUYANG Zhi-Yun¹, ZHAO Jing-Zhu¹, WANG Xiao-Ke¹, HAN Yi-Shi² (1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100080, China 2. Hainan Resource and Environmental Department, Hainan 570204, China)

Abstract This paper attempts to apply Geographic Information System(GIS) technology, and utilizes the Universal Soil Loss Equation(USLE) to estimate the potential soil losses and the actual soil losses in Hainan Island. Some important data such as the spatial distribution characteristics of soil conservation of ecosystems in Hainan Island have been got. The results shows the soil conservation capacities of the mid-mountain area ecosystems are the strongest in Hainan Island. The market valuation, opportunity cost and shadow engineering methods are used to evaluate the function of soil conservation of ecosystems. The research results reveal that the total value of Hainan Island soil conservation adds up to about 74.92 million yuan (RMB) per annum, of which, about 0.49 million yuan is of decreasing soil loss, about 72.74 million yuan of holding nutrient for N, P and K, and about 1.69 million yuan of reducing reservoir silt.

Key words soil erosion; soil conservation; ecological value; GIS; USLE; Hainan Island

文章编号: 1000-0933(2000)02-0177-07 中图分类号: Q143 文献标识码: A

土壤侵蚀是世界上的主要生态破坏现象之一。国内外土壤流失预报研究已取得了丰硕的成果^[1-7], 近几年来生态系统服务功能价值研究已成为生态研究的热点, 而土壤保护正是生态系统的基本服务功能。Costanza 和 Pimentel 分别对世界和区域的生态系统土壤保持价值作了评估^[8,9]。国内也有一些学者对生态系统保护土壤的经济价值进行评估^[10-12]。海南岛土壤流失预报系统性和海南岛生态系统防止土壤侵蚀的价值评估还罕见报道。海南岛地处热带北缘及干湿热带气候的过渡带上, 发育并保存了我国面积最大的热带雨林生态系统, 在土壤保持生态服务中发挥着巨大的作用。当地落后的生产方式导致热带雨林破坏,

基金项目 中国科学院知识创新项目(RCEES9903)和国家自然科学基金(编号 79670089)资助项目。

收稿日期: 1999-09-03 修订日期: 1999-12-03

作者简介 肖 寒(1972~), 男, 湖南岳阳人, 博士。主要从事区域生态系统服务功能研究, 地理信息系统与遥感应用研究, 保护区规划及管理研究。

土壤侵蚀加剧,严重破坏了海南岛热带生物多样性和生态环境,因此,定量估算海南岛土壤侵蚀,明确引起海南岛水土流失的关键因子,确定需要采取水土保持措施的地域的研究工作迫在眉睫。从 80 年代起,国内外开始将 GIS 应用于水土保持领域。我国学者主要将其应用于水土流失信息系统的建立,GIS 在土壤流失预报方面的应用还处于起步阶段^[13]。本文在 ArcView 地理信息系统的支持下,采用国际上应用广泛的土壤流失方程(USLE)来估算海南岛潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量,并算得海南岛各类型生态系统的土壤保持量,再利用市场价值法,机会成本法和影子工程法评价各类型生态系统对土壤保持的经济价值,旨在为海南岛环境资源价值核算和生态环境保护提供科学依据。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区域概况

海南岛位于北纬 18°10′04″至 20°0′40″,东经 108°30′43″至 111°2′33″之间,地势中高周低,从中部山体向四周沿海逐级降低,构成一个由山地、丘陵、台地、平原组成的近似环形的层状地形,梯级结构明显。海南岛地处热带季风气候区域,年总降雨量充沛,年平均降雨量为 1500~2000mm,时空变化大,东湿西干,雨水主要来源于夏季,降水集中,降雨强度大,暴雨多。海南岛特殊的地理和气候发育了多种类型的土壤,在海南山地的东坡,由基带上的砖红壤,随着海拔的升高而递变到山地赤红壤和山地黄壤,在西南坡,基带上的土壤为燥红土或褐色砖红壤亚类。

1.2 土壤侵蚀量与保持量的估算方法

分别估算了海南岛现实土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量^[14,15]。潜在土壤侵蚀不考虑地表覆盖因素和土地管理因素,即 $C=1, P=1$,此时,USLE 的形式为:

$$A_p = R \cdot K \cdot LS \quad (1)$$

现实土壤侵蚀考虑了地表覆盖和土地管理因素,其计算为:

$$A_r = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

由式(1)和(2),可计算土壤保持量:

$$A_c = A_p - A_r \quad (3)$$

式中, A_p ,潜在土壤侵蚀量($t/hm^2 \cdot a$); A_r ,现实土壤侵蚀量($t/hm^2 \cdot a$); A_c 土壤保持量($t/hm^2 \cdot a$); R ,降雨侵蚀力指标($F_t \cdot T \cdot \ln/A \cdot h$); K ,土壤可蚀性因子; LS ,坡长坡度因子; C ,地表植被覆盖因子; P ,土壤保持措施因子。

1.2.1 R 值的估算 采用周伏建,黄炎和等人^[4,16]根据南方实测数据提出的 R 值计算式,该算式符合南方地理环境,考虑了月降雨量。

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792 P_i) \quad (4)$$

式中, R ,年降雨侵蚀力指标($F_t \cdot T \cdot \ln/A \cdot h$); P_i ,月降雨量(mm)。

根据(4)式算得海南岛各气象站的 R 值,再运用地理信息系统将 GPS 测得的海南岛各气象站经纬度叠加在海南岛气候图上,将点数据表面化,得到海南各地的 R 值分布特征。

1.2.2 K 值的估算 根据海南土壤调查资料^[17,18]得到海南岛各类土壤质地及其有机质含量,查找美国 Wischmeier 等建立的土壤可蚀性 K 值诺模图获得海南岛各类土壤的 K 值。

1.2.3 LS 值的估算 本文通过比例尺为 1:500,000 的数字高程模型(DEM)计算获得坡长和坡度,然后根据黄炎和等^[3]建立的方程(5)式,获得海南岛 LS 的空间分布特征。

$$LS = 0.08 \lambda^{0.35} \alpha^{0.6} \quad (5)$$

式中, λ ,坡长(m); α ,百分比坡度。

1.2.4 C 值的估算 地表覆盖因子是根据地面植被覆盖状况不同而反映植被对土壤侵蚀影响的因子,与土地利用类型、覆盖度密切相关。根据海南岛植被考察所得的不同植被及其平均盖度查 USLE 中 C 值表^[19]获得海南岛不同植被类型的 C 值(表 1)。

1.2.5 P 值的估算

表 1 不同植被覆盖的 C 值
Table 1 The C value of various vegetation

植被类型 Vegetation types	C 值 C value	植被类型 Vegetation types	C 值 C value
草原 ^①	0.09	热带针叶林 ^⑧	0.11
防护林 ^②	0.14	热作园及经济林 ^⑨	0.15
沟谷雨林 ^③	0.001	山地常绿阔叶林 ¹⁰	0.06
灌丛 ^④	0.085	山地雨林 ¹¹	0.02
红树林 ^⑤	0.001	山顶矮林 ¹²	0.085
农田 ^⑥	0.06	稀树草原 ¹³	0.043
热带季雨林 ^⑦	0.004	用材林 ¹⁴	0.15

注 ① Grassland ;② Windbreak forest ;③ Valley rain forest ;④ Shrubs ;⑤ Mangrove ;⑥ Crop land ;⑦ Tropical monsoon forest ;⑧ Tropical coniferous forest ;⑨ Plantation ;10 Mountainous evergreen forest ;11 Mountainous rain forest ;12 Mountaintop coppice forest ;13 Savanna ;14 Timber forest

系统 N、P、K 的平均含量。再依据(6)式估算出海南岛不同生态系统保护土壤肥力的经济效益。

$$E_f = \sum_i A_c \times C_i \times P_i / 10000 \quad (i = N, P, K)$$
 (6)

式中 E_f , 保护土壤肥力经济效益(元/a); A_c , 土壤保持量(t/a); C_i , 土壤中氮、磷、钾的纯含量; P_i , 氮、磷、钾的价格(元)。

1.5.2 根据土壤保持量和土壤表土平均厚度 0.6m^[11]来推算因土壤侵蚀而造成的废弃土地面积,再用机会成本法计算得因土地废弃而失去的年经济价值:

$$E_s = A_c \div P \div 0.6 \times B \div 10000$$
 (7)

式中 E_s , 减少土地废弃的经济效益(元/a); A_c , 土壤保持量(t/a); B , 林业年均收益(元/hm²); ρ , 土壤容重(t/m³)。

1.5.3 按照我国主要流域的泥沙运动规律,全国土壤侵蚀流失的泥沙有 24%淤积于水库、江河、湖泊^[22],根据蓄水成本来计算生态系统减轻泥沙淤积灾害的经济效益:

$$E_n = A_c \div \rho \times 24\% \times C$$
 (8)

式中 E_n , 减轻泥沙淤积经济效益(元/a); A_c , 土壤保持量(t/a); C , 水库工程费用(元/m³); ρ , 土壤容重(t/m³)。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀量 在地理信息系统的支持下,运用通用土壤侵蚀方程及其修改式计算得到海南岛潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量及其空间分布特征。

2.1.1 潜在土壤侵蚀量 海南岛潜在土壤侵蚀量在 0~170.00t/hm²·a 之间,其中 96.50%的地区土壤侵蚀量在 25.00 t/hm²·a 以下。全岛潜在土壤侵蚀总量为 1.67×10⁷t/a,平均潜在土壤侵蚀量为 4.93t/hm²·a。海南岛中部山区,主要包括琼中、通什、乐东、陵水、昌江等中西部县市,由于地处高山,坡度大,坡长长,土壤侵蚀危险高,其平均潜在土壤侵蚀量在 10.00t/hm²·a 以上。山顶矮林、山地常绿阔叶林、山地雨林、沟谷雨林、热带季雨林等生态系统的平均潜在土壤侵蚀量较大,都在 10.00t/hm²·a 以上(表 2)。

2.1.2 现实土壤侵蚀量 海南岛现实土壤侵蚀量在 0~16.55t/hm²·a 之间,其中 96.20%的地区土壤侵蚀量在 2.0t/hm²·a 以下。全岛土壤侵蚀总量为 9.07×10⁵t/a,平均土壤侵蚀量为 0.27t/hm²·a(表 2)。中部山区现实土壤侵蚀量在 1.00t/hm²·a 以上。周围台地、平原和中部山区沟谷地区土壤侵蚀量在 0~1.00t/hm²·a 之间。按无流失级别(5.00t/hm²·a 以下)标准,海南岛台地、平原和中部山区沟谷地区均为无流失区域。

海南岛水稻多分布在沿海平原,台地、沟谷有零星分布,其耕作方式为等高耕作,水田的 P 值为 0.15,其余土地利用方式基本上没有采取水土保持措施,因此取值为 1.00^[13,20]。

1.3 月平均降雨量

降雨资料取自海南气象局 1951~1980 年 29a 的各月平均雨量。

1.4 地图数据

海南岛地形图、土壤图、气候图、土地利用图、植被图,比例尺均为 1:500,000^[21]。

1.5 生态系统土壤保持价值评估方法

运用市场价值法,机会成本法和影子工程法从保护土壤肥力,减少土地废弃和减轻泥沙淤积灾害 3 个方面来评价生态系统土壤保持经济效益。

1.5.1 土壤侵蚀使大量的土壤营养物质流失,主要是土壤中 N、P、K。不同土壤中的 N、P、K 含量大不相同^[17,18],运用 GIS 技术计算出海南岛不同生态

表 2 不同类型生态系统土壤侵蚀与土壤保持
Table 2 Soil erosion and soil conservation of various ecosystems

生态系统类型	面积(hm ²)	土壤侵蚀总量(t/a)		平均侵蚀量(t/hm ² ·a)		土壤保持量		
		Total soil losses		Average soil erosion rate		(t/hm ² ·a)		
		现实	Actual	潜在	Potential	现实	Actual	潜在
热作园及经济林 ^①	551087.00	307820.94	2052188.88	0.5586	3.7239	3.1653		
用材林 ^②	8137.00	3032.06	20215.86	0.3726	2.4844	2.1118		
防护林 ^③	63466.00	6977.21	49839.63	0.1099	0.7853	0.6754		
热带针叶林 ^④	6792.00	5081.78	46105.64	0.7482	6.7882	6.0400		
草原 ^⑤	429021.00	195271.19	2169698.25	0.4552	5.0573	4.6021		
灌丛 ^⑥	627983.97	274609.63	3230762.25	0.4373	5.1446	4.7073		
山顶矮林 ^⑦	6447.00	10356.06	122009.42	1.6063	18.9250	17.3187		
山地常绿阔叶林 ^⑧	36484.00	36468.00	608068.81	0.9996	16.6667	15.6671		
稀树草原 ^⑨	7508.00	933.17	22039.52	0.1243	2.9355	2.8112		
山地雨林 ¹⁰	99734.00	30774.10	1538645.38	0.3086	15.4275	15.1189		
农田 ¹¹	1018233.96	15335.50	1707292.38	0.0151	1.6767	1.6616		
热带季雨林 ¹²	501705.01	20435.32	50103123.50	0.0407	10.1716	10.1309		
红树林 ¹³	1801.00	2.69	873.39	0.0015	0.4847	0.4832		
沟谷雨林 ¹⁴	3832.00	49.36	47983.03	0.0129	12.5217	12.5088		

注 ①Plantation ②Timber forest ③Windbreak forest ④Tropical coniferous forest ⑤Grassland ⑥Shrubs ⑦Mountain-top coppice forest ⑧Mountainous evergreen forest ⑨Savanna ⑩Mountainous rain forest ⑪Crop land ⑫Tropical monsoon forest ⑬Mangrove ⑭Valley rain forest

2.1.3 生态系统土壤保持作用 将海南岛各类型生态系统的平均现实土壤侵蚀量和平均潜在土壤侵蚀量相比较可以看出,山顶矮林、山地常绿阔叶林、山地雨林、沟谷雨林、热带季雨林的土壤保持量较大,都在10.0t/hm²·a以上(表2)。若用平均潜在土壤侵蚀量与平均现实土壤侵蚀量的比值表示生态系统防止土壤侵蚀的能力,则沟谷雨林的土壤保持能力最强,其平均潜在土壤侵蚀量与平均现实土壤侵蚀量的比值达970(图1),其次是红树林、热带季雨林、农田和山地雨林,其比值依次为323、249、111、49。这是由于热带森林,包括沟谷雨林、热带季雨林和山地雨林,浓密的冠层消减暴雨势能,缓冲暴雨对土壤的击打,且厚厚的森林枯枝落叶层是减少土壤侵蚀的天然屏障。红树林和农田的平均潜在土壤侵蚀量虽然不大,但因其分布处地势平坦,几乎接近零,平均现实土壤侵蚀量非常小,因此其比值很大,防侵蚀能力很强。热作园、用材林和防护林生态系统土壤保护能力较弱,其比值在6~8之间。

海南岛中部山区被广大的沟谷雨林、热带季雨林、山地雨林、山顶矮林、山地常绿阔叶林覆盖,这里的生态系统防止土壤侵蚀的能力较大,局部地区的土壤保持量在25~169t/hm²·a之间(图2)。

研究还显示,海南岛中部山体东面较西面的土壤保护能力强,这是因为海南岛季风降雨和台风雨多从东部登陆之故。

2.2 生态系统土壤保持价值评估

依据(6)、(7)、(8)式,计算得海南岛不同类型生态系统因防止土壤侵蚀而减少废弃地,保持营养物质和减轻泥沙淤积灾害3方面的价值(表3)。海南岛生态系统因防止土壤侵蚀而减少废弃地的总价值为49.37万元,全岛生态系统保持营养物质的总价值为7274.22万元,其中N为6716.78万元,P为49.73万元,K为507.71万元,生态系统减轻泥沙淤积灾害方面的总价值为168.82万元。则海南岛生态系统防止土壤侵蚀的总生态经济价值为三者之和,7492.41万元。

随着生态系统类型的不同,单位面积的土壤保持生态价值有很大的差别(图3)。山顶矮林的单位面积土壤保持生态价值最高为142元/hm²·a,其次为山地常绿阔叶林,山地雨林,沟谷雨林和热带季雨林,分

别为 120 元/hm²·a,110 元/hm²·a,70 元/hm²·a 和 49 元/hm²·a。这表明在海南岛特有的地形条件和自然气候下,这些热带森林生态系统不能被破坏,一旦破坏,丧失的自然资源价值就特别大。

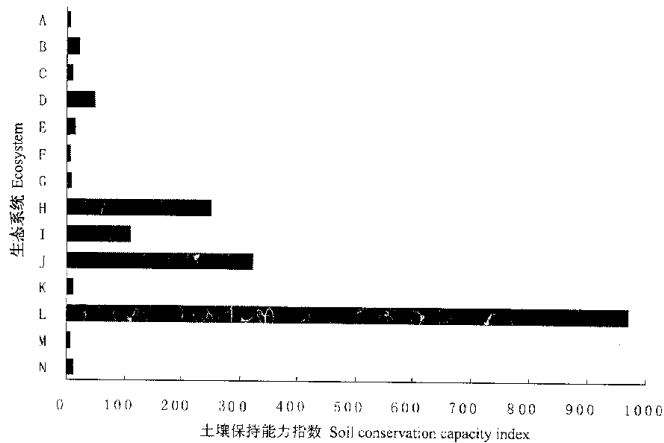


图 1 生态系统保持土壤的能力

Fig.1 Ecosystem soil conservation capability

A 用材林 Timber forest B 稀树草原 Savanna C 山顶矮林 Mountain-top coppice forest D 山地雨林 Mountainous rain forest E 山地常绿阔叶林 Mountainous evergreen forest F 热作园 Plantation G 热带针叶林 Tropical coniferous forest H 热带季雨林 Tropical monsoon forest I 农田 Grop land J 红树林 Mangrove K 灌丛 Shrubs L 沟谷雨林 Valley rain forest M 防护林 Windbreak forest N 草原 Grassland

3 讨论

3.1 由于海南岛地理与气候特点,土壤侵蚀因子 R、K、LS 值均表现为中部山区最高,向四周逐渐递减。

3.2 海南岛现实土壤侵蚀量在 0~16.55t/hm²·a 之间,其中 96.20%的地区土壤侵蚀量在 2.0t/hm²·a 以下,而海南岛各地土壤侵蚀量多年平均实测值在 0~2.0t/hm²·a 之间^[23]。证明本研究关于海南土壤侵蚀量的估计与海南岛各地土壤侵蚀量多年平均实测值比较吻合,这说明运用 GIS 技术研究大区域土壤侵蚀是一种可行的方法与技术途径。同时 GIS 还能够与遥感技术很好地结合,快速更新大区域的信息,因此 GIS 在大区域的土壤侵蚀量研究中具有广阔的前景。

3.3 海南岛生态系统在海南土壤保持中发挥了巨大的作用,全岛潜在土壤侵蚀总量为 1.67×10⁷t/a,现实土壤侵蚀总量为 9.07×10⁵t/a,年土壤保持总量为 1.58×10⁷t。年土壤保持生态经济总价值为 7492.41 万元。研究表明,海南岛热带森林,包括沟谷雨林、山地雨林、热带季雨林,在中部山区土壤保持中起着关键的作用。这些森林类型一旦被破坏,则土壤侵蚀剧增,严重削弱海南生态系统服务功能。因此,在未来海南岛发展中一定要注意中部山区生态系统保护与发展,以免影响海南可持续发展。

3.4 鉴于生态资源的多功能性导致的多价值性^[10],土地资源破坏的经济损失有着复杂的内容,有的是生产或效益意义上的,有的是消费或成本意义上的,有的可以在市场内得到估价,有的必须经外部性内部化途径进行评价。但这种内部化功能是有限的,又由于研究区域数据的缺乏,本文未计算土壤侵蚀导致发电量减少

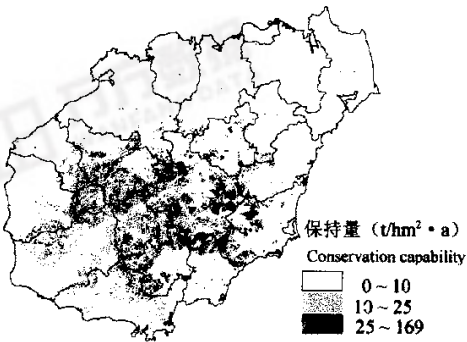


图 2 土壤保护空间分布特征

Fig.2 The spatial distribution of soil conservation capacity

和灌溉受阻的损失,灾害损失与抗灾费用等,也未考虑红树林生态系统保护海岸的经济价值,这必然导致计算结果偏低。

表 3 生态系统保护土壤的生态经济价值

Table 3 Monetary value of ecosystem soil conservation

生态系统类型 Ecosystem types	面积 (hm ²) Area	减少废弃地 (元/a) ¹⁵	减轻淤积 (元/a) ¹⁶	N (元/a)	P (元/a)	K (元/a)	合计 (万元/a)
红树林 ^①	1801.00	24.89	85.09	1177.37	17.77	98.12	0.14
防护林 ^②	63466.00	1238.98	4236.33	63900.72	858.44	6218.65	7.65
农田 ^③	101823.96	52009.11	177830.34	4540863.50	42522.61	453099.41	526.63
用材林 ^④	8137.00	532.14	1819.50	62748.95	501.39	5164.64	7.08
稀树草原 ^⑤	7508.00	656.10	2243.36	62988.46	583.97	5714.91	7.22
热作园及经济林 ^⑥	551087.00	54215.86	185375.69	5364568.50	47908.77	496030.41	614.81
灌丛 ^⑦	627983.00	91920.51	314296.03	10331811.00	83864.59	911957.25	1173.38
热带针叶林 ^⑧	6792.00	1269.91	4342.09	121606.20	1202.51	9338.22	13.78
草原 ^⑨	429021.00	61673.76	210875.86	9576250.00	67746.59	638574.56	1055.51
热带季雨林 ¹⁰	501705.01	158491.38	541916.13	2170772.00	153843.14	1799603.00	2436.16
沟谷雨林 ¹¹	3832.00	1506.75	5151.92	244147.50	1751.20	14514.35	26.71
山地雨林 ¹²	99734.00	48128.10	164560.34	10141957.00	64656.52	517943.44	1093.72
山地常绿阔叶林 ¹³	36484.00	18426.53	63004.29	4086307.25	26298.44	184475.98	437.85
山顶矮林 ¹⁴	6447.00	3639.14	12443.02	861753.38	5540.20	34332.94	91.77
合计	3362231.00	493733.16	1688179.99	67167851.83	497296.14	5077065.88	7492.41

注 ①Mangrove ②Windbreak forest ③Crop land ④Timber forest ⑤Savanna ⑥Plantation ⑦Shrubs ⑧Tropical coniferous forest ⑨Grassland 10Tropical monsoon forest 11Valley rain forest 12Mountainous rain forest 13Mountainous evergreen forest 14Mountain-top coppice forest. 15decreasing soil loss 16reducing reservoir silt

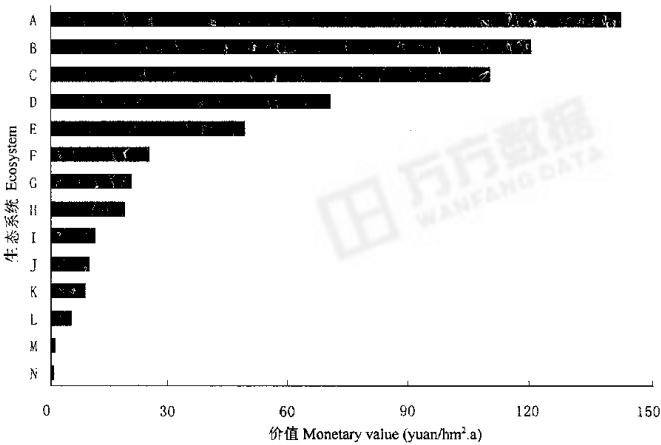


图 3 海南岛不同类型生态系统中单位面积土壤保持生态价值

Fig.3 Ecosystem soil conservation value in Hainan Island

A 高山矮林 Mountain-top coppice forest B 山地常绿阔叶林 Mountainous evergreen forest C 山地雨林 Mountainous rain forest D 沟谷雨林 Valley rain forest E 热带季雨林 Tropical monsoon forest F 草原 Grassland G 热带针叶林 Tropical coniferous forest H 灌丛 Shrubs I 热作园 Plantation J 稀树草原 Savanna K 用材林 Timber forest L 农田 Crop land M 防护林 Windbreak forest N 红树林 Mangrove.

参考文献

- [1] 孙立达,孙保平,陈禹,等.西吉县黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失量预报方程.自然资源学报,1988,3(2):141~153.
- [2] 贾志军,等.晋西黄土高原降雨侵蚀力研究.中国水土保持,1991,(1):43~46.
- [3] 黄炎和,卢程隆.通用土壤流失方程在我国的应用研究进展.福建农学院学报,1993,22(1):73~77.
- [4] 周伏建,黄炎和,等.福建省降雨侵蚀力指标 R 值.水土保持学报,1995,9(1):14~18.
- [5] 陈明华,周伏建,等.土壤可蚀性因子的研究.水土保持学报,1995,9(1):19~24.
- [6] Lal R. Soil erosion research methods, Florida, St. Lucie Press, 1994.
- [7] Wischmeier W H and Smith D D. Predicting rainfall erosion loss: a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537. Washington, DC, 1978.
- [8] Costanza R. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253~260.
- [9] Pimentel D. *et al.* Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefit. *Science*, 1995, 267: 1117~1123.
- [10] 徐嵩龄. 中国环境破坏的经济损失的计量研究 它的意义、方法、成果及研究建议. 见: 徐嵩龄主编. 中国环境破坏的经济损失计量 实例与理论研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1998, 179~223.
- [11] 薛达元,包浩生,李文化. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估. 中国环境科学, 1999, 19(3): 247~252.
- [12] 欧阳志云,等. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607~613.
- [13] 游松财,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62~67.
- [14] 欧阳志云,等. 生态位适宜度模型及其在桃江土地利用生态规划中的应用. 生态学报, 1996, 16(2): 113~120.
- [15] Ouyang Zhiyun, Wang Rusong, Jason Weismen, Fu Guinan. Ecological planning for Taojiang rural sustainable development. *Journal of Environmental Science*, 1995, 7(3): 304~316.
- [16] 黄炎和,等. 福建省土壤流失预报研究. 水土保持学报, 1995, 9(1): 25~30.
- [17] 海南省农业厅土肥站. 海南土壤. 海口: 海南出版社, 1994.
- [18] 海南省农业厅土肥站. 海南土种志. 海口: 海南出版社, 1994.
- [19] 王万忠,焦菊英. 中国土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1~20.
- [20] CSAR. Erosion hazard assessment. In Second Land Resource Evaluation and Planning Project (LREP ~ II) Part C. Technical Report No. 16, Version 1.0, Bogor, Indonesia. 1995. 7~12.
- [21] 广州地理研究所. 海南岛热带自然资源图. 北京: 科学出版社, 1985.
- [22] 欧阳志云,王如松,等. 中国生物多样性间接价值评估初步研究. 见: 王如松等编. 现代生态学的热点问题研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996, 409~421.
- [23] 景可,卫林,王景华. 海南岛的土壤侵蚀和生态环境. 见: 冯世骏主编. 中国海南岛大农业建设与生态平衡论文选集. 北京: 科学出版社, 1987, 115~124.