

青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值

肖 玉, 谢高地, 安 凯

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:在 GIS 手段支持下,运用通用土壤流失方程(USLE)研究了青藏高原生态系统土壤保持功能,并评价了其经济价值。研究表明,在总面积为 $1.49 \times 10^8 \text{hm}^2$ 的青藏高原林地、草地、沼泽和农田生态系统上,土壤保持总量为 $3.77 \times 10^6 \text{t/a}$,其经济价值总计为 $5.59 \times 10^8 \text{RMB/a}$,占西藏和青海两省(区)2000 年种植业、林业和牧业收入的 6.17%。其中保持土壤养分的经济价值为 $3.68 \times 10^8 \text{RMB/a}$,减少废弃土地的经济价值为 $0.26 \times 10^8 \text{RMB/a}$,减少泥沙淤积的经济价值为 $2.00 \times 10^8 \text{RMB/a}$ 。由此可见,青藏高原生态系统服务功能对当地社会和经济发展有着重要的作用。

关键词:青藏高原;土壤保持;土壤侵蚀;通用土壤流失方程

The function and economic value of soil conservation of ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau

XIAO Yu, XIE Gao-Di, AN Kai (The Institute of Geographical Science and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2367~2378.

Abstract: Soil conservation is one of the basic functions provided by terrestrial ecosystems. Its importance has been increasingly recognized in recent years. The development of quantitative estimation of soil erosion supports an effective way to study the contribution of soil conservation functions of ecosystems.

In view of the increasing degradation of soil, this article examines the economic values and the soil conservation functions from ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau (QTP). The soil conservation functions analysed in QTP include: protection of soil fertility, reduction of soil disuse and decrease of soil deposit. The soil conservation of ecosystems is critical in QTP because it prevents soil erosion into the rivers, especially the heads of many main rivers of China, and protects farmlands. Soil erosion by water can result in the degradation of the quality of farmlands, which may lead to land disuse. Soil deposits from eroded soils can enter into water bodies and may decrease the capacities of water storage of lakes, rivers and reservoirs. Soil erosion may also result in a considerable loss of fertility in the surface soil. Ecosystems, such as forests, grasslands, farmlands and wetlands, can thus prevent those phenomena from occurring by controlling soil erosion.

In order to characterize the impacts of internal heterogeneity of the ecosystems, Geographical Information System methods were used to determine the area of four classes and twenty-seven subclasses

基金项目:国家自然科学基金资助项目(#30230090);中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-333)

收稿日期:2003-03-19; **修订日期:**2003-08-10

作者简介:肖 玉(1976~),女,四川省双流县人,博士研究生。主要从事生态系统服务功能研究。Email: xiaoyu@igsnr.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30230090) and the Key Research Program in Innovation Projects of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-333)

Received date: 2003-03-19; **Accepted date:** 2003-08-10

Biography: XIAO Yu, Ph. D. candidate, main research field: ecosystem services.

of vegetation cover, and the spatial distribution of economic value of soil conservation by the different ecosystems in QTP. An integrated spatial database was initially established using a workstation-based Arc/Info system. The data sets include the vegetation map at the scale of 1 : 1000000, the water systems map, and remote sensing landuse map at the scale of 1 : 1000000 precipitation from May to October of 137 weather stations in QTP from 1990 to 2000. All of the data sets and topography for QTP were organized at the scale of 1 : 4000000.

The quantity of soil conservation (QSC) can be obtained from the difference between the quantity of actual and potential soil erosion. The quantity of actual and potential soil erosion was calculated by using the Universal Soil Loss Equation. The economic value of protection of soil fertility refers to the economic value of protection of soil fertility such as N, P and K, and can be estimated with QSC, the average content of soil nutrients (N, P and K) and the market price of N, P and K. The economic value of disused soil can be calculated with the quantity of soil conservation per hectare, the area of each type of ecosystems, the density of soil and the economic profit of area unit of each type of ecosystems. The economic value of decrease of soil deposits can be estimated with QSC, the cost of reservoir construction and 24 percent deposit rate (the ratio of the amount of soil deposit accounting for the total amount of soil erosion in the watersheds of most rivers in China).

The results indicate that the quantity of soil conservation is 377.03 million t/a. The total economic value of soil conservation has been estimated to be 559.01 million yuan/a, accounting for 6.17% of the total output of plant production, forestry and animal husbandry in Tibet and Qinghai Province in 2000. The economic value of protection of soil fertility, reduction of land disuse and decrease of soil deposit are 368.06 million yuan/a, 26.48 million yuan/a and 200.47 yuan/a, respectively. All of these contribute considerably to human welfare in local area and cannot be replaced by man-made ways. In addition, we analyzed the spatial distribution of the economic value of soil conservation by ecosystems of QTP.

However, the soil conservation functions of ecosystems in QTP are only one contribution of the overall ecosystem services provided by them. The economic value of other ecosystem services together may be far higher. Therefore we are convinced, that the total economic value of ecosystem services must be a quite substantial contribution to the human welfare in the local areas analyzed. In addition, it is impossible to replace them by man-made ways. With this work we hope to contribute to the conservation of soil of QTP and the restoration of ecosystem services of soils in QTP.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; soil retention; soil erosion; the universal soil loss equation

文章编号:1000-0933(2003)11-2367-12 中图分类号:Q149 文献标识码:A

土壤侵蚀是近年来全世界面临的一个严峻问题,国内外许多专家和学者在这方面作了深入的研究。20世纪60年代美国水土保持学家 Wischmeier 提出的通用土壤流失方程为定量研究土壤侵蚀问题提供了有效的方法^[1]。我国在20世纪80年代开始运用通用土壤流失方程对区域土壤侵蚀强度进行了研究,并对方程的参数进行了大量的探讨^[2-4]。

作为生态学重要分支的生态系统服务功能研究的发展,使得人们对陆地生态系统的重要性有了更新的认识。土壤保持功能是一项非常基本的陆地生态系统服务功能,近年来日益受到重视,而土壤侵蚀量化研究方法的发展,为生态系统土壤保持功能研究提供了很好的方法基础。早在1995年 Pimentel 就开始了生态系统保护土壤功能的研究^[5]。在我国欧阳志云等在1999年对我国生态系统保护土壤的功能进行了研究^[6];2000年肖寒等对海南岛生态系统土壤保持空间分布特征及生态经济价值作了评估^[7]。同时,青藏高原平均海拔4000m以上,是世界上独一无二的地理单元,其独特的自然地理条件,使生物及其环境在发生和发展过程中形成了特有的规律。但是,近年来由于人类干扰的加剧,青藏高原生态系统受到很大的影响,

特别是高原东南部地区的生态脆弱带更是土壤侵蚀高发区。

因此,在以上研究基础上对青藏高原生态系统保护土壤服务功能及其经济价值进行研究,有助于深入的认识青藏高原生态系统保护土壤的重要性,加强对生态系统保护,保证其生态服务功能的正常发挥。

1 研究区概况

青藏高原在我国境内部分西起帕米尔高原、东至横断山脉,南自喜马拉雅山脉南缘,北迄昆仑山-祁连山北侧,东西长约 2945km,南北宽达 1532km,范围为 $26^{\circ}00'12''\sim 39^{\circ}46'50''N$, $73^{\circ}18'52''\sim 104^{\circ}46'59''E$ ^[8]。青藏高原境内地势变化显著,地貌类型复杂多样,既有深切的高山峡谷,又有平坦辽阔的高原,形成了热带、亚热带、温带、寒带和湿润、半湿润、半干旱和干旱等多种多样的气候类型,这为多种生物和多样生态系统的形成和发育奠定了基础。由于青藏高原地域辽阔,地形复杂,海拔高度变化很大,所以地面气候因素差异十分显著。日平均气温稳定通过 $10^{\circ}C$ 日数,藏东南地区为 260~350d,十分有利于喜温暖的热带和亚热带常绿阔叶林中植物的生长发育,而高原中部的藏北高原很少出现或几乎不出现日均气温 $\geq 10^{\circ}C$,不能种植作物,只能生长稀疏的耐寒灌草。藏东南的平均降水量在 4000mm 以上,藏东北高原年均降水量为 300~500mm,藏西北高原年均降水量仅 20~75mm^[9]。

为了对青藏高原生态系统及其土壤保护功能经济价值空间分布进行研究,本文采用 Arc/Info 软件建立了集成的空间数据库,数据集包括:1:1,000,000 植被图(中国科学院地理研究所,1982);水系图(地图出版社,1988);1:1,000,000 遥感土地利用图(中国科学院,1989);青藏高原所在的西藏、青海、新疆、云南、四川等省(区)的 137 个气象台站 1990~2000 年每月降水数据(中国科学院生态网络中心,2002)。所有的数据集和拓扑分析以 1:4000000 比例尺进行组织。利用 Arc/Info 软件确定了青藏高原 4 种类型和 27 个亚类生态系统的面积和分布(图 1)。这些面积将用于计算青藏高原生态系统土壤保护功能的经济价值,

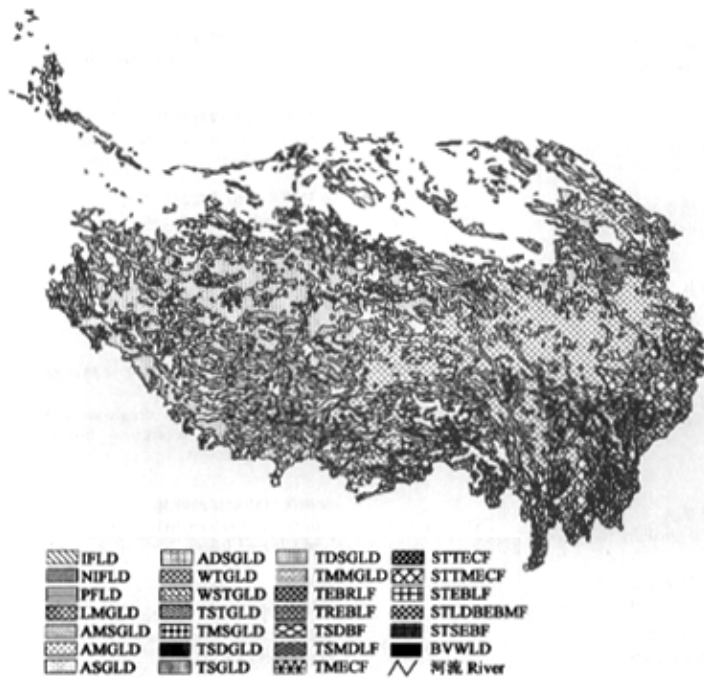


图 1 青藏高原植被分布

Fig. 1 Vegetation in Qinghai-Tibet Plateau (QTP)

所有的计算将以 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的栅格为单元在 Arc/Info 中进行。为了下面的图表易于表达,文中对青藏高原生态系统名称采用了简称(如表 1)。

表 1 青藏高原植被类型及其简称

Table 1 The vegetation types and their abbreviations in QTP

序号 No.	植被类型 Vegetation type	简称 Abbreviation	序号 No.	植被类型 Vegetation type	简称 Abbreviation
1	农田 Farmland	FLD	15	温性荒漠草原 Temperate desert steppe	TDSGLD
	水浇地 Irrigated farmland	IFLD	16	温性山地草甸 Temperate mountain meadow	TMMGLD
2	旱地 Non-irrigated farmland	NIFLD		林地 Forest	F
3	稻田 Paddy	PFLD	17	温带山地常绿针叶林 Temperate mountain evergreen coniferous forest	TMECF
	草地 Grassland	GLD	18	温带亚热带落叶阔叶林 Temperate and sub-tropical deciduous and broad-leaved forest	TSDBF
4	低地草甸 Lowland meadow	LMGLD	19	温带亚热带山地落叶小叶片 Temperate and sub-tropical mountain deciduous and lobule forest	TSMDLF
5	高寒草甸草原 Alpine meadow steppe	AMSGLD	20	热带常绿阔叶雨林 Tropical evergreen broad-leaved rainforest	TEBRLF
6	高寒草甸 Alpine meadow	AMGLD	21	热带雨林常绿阔叶林 Tropical rainforest evergreen broad- leaved forest	TREBLF
7	高寒草原 Alpine steppe	ASGLD	22	亚热带热带常绿针叶林 Sub-tropical and tropical evergreen coniferous forest	STTECF
8	高寒荒漠草原 Alpine desert steppe	ADSGLD	23	亚热带热带山地常绿针叶林 Sub-tropical and tropical mountain evergreen coniferous forest	STTMECF
9	暖性草丛 Warm tussocks	WTGLD	24	亚热带常绿阔叶林 Sub-tropical evergreen broad-leaved forest	STEBLF
10	暖性灌草丛 Warm shrubby tussocks	WSTGLD	25	亚热带石灰岩落叶阔叶-常绿阔叶混 交林 Sub-tropical limestone deciduous and broad-leaved and evergreen broad- leaved mixed forest	STLDBEBMF
11	热性灌草丛 Tropical shrubby tussocks	TSTGLD	26	亚热带硬叶常绿阔叶林 Sub-tropical sclerophyllous evergreen broad-leaved forest	STSEBF
12	温性草甸草原 Temperate meadow steppe	TMSGLD		湿地 Wetland	WLD
13	温性草原荒漠 Temperate steppe desert	TSDGLD	27	沼泽 Bog vegetation	BVWLD
14	温性草原 Temperate steppe	TSGLD			

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀量与保持量的估算方法

运用通用土壤流失方程(USLE)来估算青藏高原潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量,两者之差即为青藏高原生态系统土壤保持量。

潜在土壤侵蚀量指生态系统在没有植被覆盖和水土保持措施情况下的土壤侵蚀量。在通用土壤流失方程中不考虑地表覆盖因素和水土保持因素,即 $C=1, P=1$, 此时通用土壤流失方程成为:

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

现实土壤侵蚀量考虑地表覆盖和水土保持因素,通用土壤流失方程为:

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

由(1)和(2)可以计算土壤保持量:

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

式中, A_p 为单位面积潜在土壤侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; A_r 为单位面积现实土壤侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; $A_p - A_r$ 为单位面积土壤保持量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力指标; 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 水土保持措施因子。

2.1.1 R 值的估算 R 是降雨侵蚀力指标。侵蚀力指标是衡量特定降雨侵蚀力的手段。孙保平等^[10]提出了宁夏西吉县 R 和 P_{5-10} (是指从 5 月到 10 月份的降雨量之和) 之间的线性关系。这种关系非常直观而且易于计算。对青藏高原 13 个气象站从 1990 年到 2000 年 5~10 月降雨量均值(生态网络中心, 2002)和王万忠等^[11,12]提出的该站的 R 值做回归分析。 R 和 P_{5-10} 的线性关系如下:

$$R = 0.0355P_{5-10} + 0.6576 \quad (4)$$

其中, P_{5-10} 为青藏高原 5~10 月份降雨量总和 (mm); R 是降雨侵蚀力指数 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]。用公式(4), 计算了青藏高原 129 个气象站的 R 值。然后用 Arc/Info 8.1 软件以 Krige 插值方法插值得到青藏高原每个 $1km \times 1km$ 栅格的 R 值。

2.1.2 K 值的估算 K 通常被称作土壤侵蚀因子^[13], 其值由影响可蚀性的土壤性质决定, 包括以下几点: (1) 影响渗透率、渗透性和总水容量的性质; (2) 抵抗分散、溅蚀、磨损和降水和水土流失输送力的性质^[1]。同种类型植被覆盖的土壤具有相似的性质。在青藏高原不同生态系统土壤质地和有机质含量^[14]基础上, 根据相关学者提供的 K 值表, 可以得到该区不同生态系统的 K 值(表 2)^[14~16]。

2.1.3 LS 值的估算 LS 是地形因子, 包括坡长因子 (L) 和坡度因子 (S), 在实践中为了便于研究往往将其作为一个地形因子考虑^[1]。在 Arc/Info 8.1 中栅格的坡度可以由数字高程模型 (DEM) 提取, 坡长可以由栅格尺寸和坡度得到。根据 Wischmeier 和 Smith 得出的 LS 关系式(5), 得到青藏高原 LS 的空间分布:

$$LS = \left(\frac{l}{22} \right)^{0.3} \left(\frac{\theta}{5.16} \right)^{1.3} \quad (5)$$

其中, l 为坡长 (m); θ 为坡度 ($^\circ$)。

2.1.4 C 值的估算 C 为地表覆盖因子, 其反映了不同地面植被覆盖状况对土壤侵蚀的影响, 它与土地利用类型和覆盖度等关系密切。根据青藏高原的植被类型和覆盖度, 并结合国内外相关的研究资料, 得到青藏高原不同植被类型的 C 值(如表 3)。

2.1.5 P 值的估算 P 水土保持措施因子, 青藏高原林地、草地、沼泽和耕地生态系统大部分土地利用方式没有采取水土保持措施, 其 P 值取 1.00; 耕地生态系统中仅水稻田有一定的水保措施, 其 P 值为 0.15^[7]。

2.2 青藏高原生态系统土壤保持价值评估

2.2.1 土壤保持总量 青藏高原生态系统保持土壤的总量 (Quantity of Soil Conservation) 的关系式为:

$$QSC = \sum_i (A_i \times m_i) \quad (6)$$

其中, QSC 为土壤保持总量 (t/a); A_i 为单位面积土壤保持量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; m_i 是第 i 种生态系统的面积

积(hm^2); i 为生态系统类型。

表 2 青藏高原不同类型植被的 K 值

Table 2 K value of different types of vegetation in QTP

植被类型 Vegetation type	主要土壤质地 ^a Soil texture	K ($\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h}$) / ($\text{hm} \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$)	植被类型 Vegetation type	主要土壤质地 ^a Soil texture	K^*
FLD			TDSGLD	砂土、砂壤 Sand, Sand loam	0.407 ^b
IFLD	砂壤 Sand loam	0.615 ^b	TMMGLD	砂壤、砂土 Sand loam, Sand	0.407 ^b
NIFLD	砂壤、粘壤 Sand loam, Clay loam	0.53 ^b	F		
PFLD	砂壤 Sand loam	0.48 ^b	TMECF	砂壤 Sand loam	0.321 ^c
GLD			TSDBF	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.321 ^c
LMGLD	砂壤、砂土 Sand loam, Sand	0.407 ^b	TSMDLF	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.321 ^c
AMSGLD	砂壤、砂土 Sand loam, Sand	0.523 ^b	TEBRLF	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.372 ^c
AMGLD	砂壤、砂土 Sand loam, Sand	0.523 ^b	TREBLF	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.372 ^c
ASGLD	砂土、砂壤 Sand, Sand loam	0.653 ^b	STTECF	砂壤、砾质壤土 Sand loam, gravelly loam	0.324 ^c
ADSGLD	砂土 Sand	0.525 ^b	STTMECF	砂壤、砾质壤土 Sand loam, gravelly loam	0.324 ^c
WTGLD	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.485 ^b	STEBLF	砂壤、砾质壤土 Sand loam, gravelly loam	0.324 ^c
WSTGLD	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.485 ^b	STLDBEBMF	砂壤、砾质壤土 Sand loam, gravelly loam	0.324 ^c
TSTGLD	砂壤、粉砂壤土 Sand loam, Silt loam	0.485 ^b	STSEBF	砂壤、砾质壤土 Sand loam, gravelly loam	0.324 ^c
TMSGLD	砂壤、砂土 Sand loam, Sand	0.407 ^b	WLD		
TSDGLD	砂土、砂壤 Sand, Sand loam	0.407 ^b	BVWLD	粘土、砂壤 Clay, Sand loam	0.547 ^b
TSGLD	砂壤、砂土 Sand loam, Sand	0.407 ^b			

a 西藏自治区土地管理局 LMBTP^[14](1994); b 王万忠等 Wang *et al.*^[15](1996); c 杨子生 Yang^[16](1999)

2.2.2 经济价值计算 青藏高原生态系统保持土壤的经济价值主要体现在以下几个方面^[18];

(1) 保持土壤养分的经济价值

保持土壤养分的经济价值主要指生态系统保持土壤中 N、P、K 营养物质的经济价值,根据青藏高原土壤中养分的平均含量,采用(6)式可计算青藏高原不同类型生态系统保持土壤营养物质的经济价值。

$$E_n = \sum_i (QSC \times C_i \times n_i \times P_i) \quad (i = N, P, K) \quad (7)$$

其中, E_n 为保持土壤养分经济价值(RMB/a); QSC 为土壤保持总量(t/a); C_i 为土壤中养分(N、P、K)平均含量; n_i 为土壤中碱解氮、速效磷和速效钾折算为硫酸铵、过磷酸钙和氯化钾的系数; P_i 为 N、P、K 的价格(RMB/t)。

表 3 青藏高原不同类型植被的 C 值

Table 3 The C value of different type of vegetation in QTP

植被类型 Vegetation type	C	植被类型 Vegetation type	C
FLD		TDSGLD	0.09 ^b
IFLD	0.55 ^a	TMMGLD	0.09 ^b
NIFLD	0.55 ^a	F	
PFLD	0.06 ^b	TMECF	0.06 ^b
GLD		TSDBF	0.06 ^b
LMGLD	0.05 ^c	TSMDLF	0.06 ^b
AMSGLD	0.04 ^c	TEBRLF	0.06 ^b
AMGLD	0.04 ^c	TREBLF	0.004 ^b
ASGLD	0.15 ^c	STTECF	0.11 ^b
ADSGLD	0.15 ^c	STTMECF	0.11 ^b
WTGLD	0.15 ^c	STEBLF	0.06 ^b
WSTGLD	0.15 ^c	STLDBEBMF	0.06 ^b
TSTGLD	0.15 ^c	STSEBF	0.06 ^b
TMSGLD	0.09 ^b	WLD	
TSDGLD	0.09 ^b	BVWLD	0.06 ^a
TSGLD	0.09 ^b		

a 于书震等 Yu *et al*^[17]; b 肖寒等 Xiao *et al*^[7]; c 王万忠等 Wang *et al*^[15]

(2)减少废弃土地的经济价值

根据青藏高原生态系统保持土壤总量和土壤容重计算出保持土壤的体积,再根据全国土壤平均厚度 0.5m^[6],推算出因为土壤侵蚀而造成的废弃土地面积,最后应用机会成本法计算废弃土地的经济价值:

$$E_d = \sum_i [(A_i \times m_i \div \rho \div h) \div 1000000 \times p_w] \quad (8)$$

其中, E_d 为减少废弃土地的经济价值(RMB/a); ρ 为土壤容重(t/m^3); p_w 为*i*种生态系统单位面积的机会成本,或者*i*种生态系统的年均效益[$t/(hm^2 \cdot a)$];*i*为耕地、草地、林地; h 为土壤厚度(m)。

(3)减少泥沙淤积的经济价值

根据我国主要流域泥沙运动规律,土壤流失的泥沙有 24%淤积在水库、江河、湖泊^[18]。在采用蓄水成本来计算生态系统减少泥沙淤积的经济价值:

$$E_a = QSC \div \rho \times 24\% \times C \quad (9)$$

其中, E_a 为减少泥沙淤积的经济价值(RMB/a); QSC 为土壤保持总量(t/a); ρ 为土壤容重(t/m^3); C 为水库工程费用(RMB/ m^3)。

3 结果与分析

3.1 青藏高原生态系统保持土壤总量

运用公式(4)和(5)计算了 R 和 LS 值。根据公式(2)和(3)以及 R, LS, K, C 和 P ,可以分别计算青藏高原 27 种生态系统单位面积的现实土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量。

青藏高原各类生态系统单位面积潜在土壤侵蚀量变化范围为 24.27~1137.45 $t/(hm^2 \cdot a)$,其均值为 483.03 $t/(hm^2 \cdot a)$ (表 2)。其中单位面积潜在侵蚀量大于 100 $t/(hm^2 \cdot a)$ 的面积占总面积的 93.64%。单位面积潜在侵蚀量在 900 $t/(hm^2 \cdot a)$ 以上的是旱地生态系统、热性灌草丛类生态系统和热带常绿阔叶雨林及次生植被生态系统,主要分布在藏东地区、昆仑山脉南麓和西藏西部地区。而分布在青藏高原西北部的低地草甸、稻田、温性荒漠草原和高寒荒漠草原生态系统的单位面积潜在侵蚀量较小,在 100 $t/(hm^2 \cdot a)$ 以下。青藏高原各类生态系统潜在土壤侵蚀总量为 3.09 $\times 10^{10}t/a$ 。

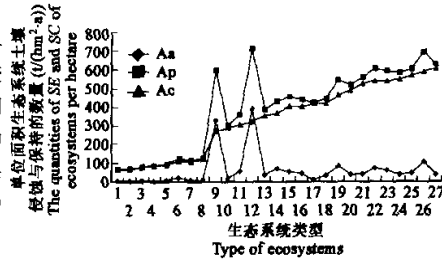
同一类型的生态系统由于分布在不同位置,其地形地貌、土壤质地等存在差别,单位面积的现实土壤侵蚀量(A_n)也不尽相同。因此,为了更清楚的结果,用平均 $A_n(\bar{A}_n)$ 代替同一类型生态系统的不同的 A_n 值:

$$\bar{A}_n = 1/n \sum_{i=1}^n A_{ni}$$

A_{ni} 是同一类型生态系统第 i 种条件下的 A_n ;"条件"是指不同的地形地貌和土壤质地等因素。

青藏高原的 \bar{A}_n 变化范围是 0.8(由稻田生态系统提供)到 389.1(由旱地生态系统提供) $t/(hm^2 \cdot a)$ (图 2)。水浇地和旱地的 \bar{A}_n 分别为 328 和 389.1 $t/(hm^2 \cdot a)$,该值远大于由李青云等计算的长江上游农田生态系统单位面积土壤侵蚀量 80.8 $t/(hm^2 \cdot a)$ ^[19]。13 种草地生态系统的平均 \bar{A}_n 为 40.5 $t/(hm^2 \cdot a)$,略大于邓贤贵计算的金沙江和雅鲁江上游草地生态系统的单位面积土壤侵蚀量 25 $t/(hm^2 \cdot a)$ ^[20]。10 种森林生态系统的平均 \bar{A}_n 为 32.7 $t/(hm^2 \cdot a)$,大于刘国强等^[21]计算的青海省森林生态系统单位面积土壤侵蚀量 10 $t/(hm^2 \cdot a)$ 。农田生态系统具有最高的 \bar{A}_n 值是因为其陡峭的地形、较少的覆盖率和不合理的种植制度。因为覆盖度很高,草地、湿地和森林的 \bar{A}_n 要远小于农田。

青藏高原单位面积生态系统土壤保持量(A_c)可由公式(3)计算得出,同时也可以由同一类型生态系统单位面积平均土壤保持量(\bar{A})代替 A_c 。青藏高原的 \bar{A} 变化范围是61.9(由温带亚热带落叶阔叶林提供)到598.3 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$) (由高寒草甸提供)。森林生态系统的植被覆盖率高于其它类型的生态系统,这很有利于保持水土和减少降水侵蚀,因此大部分森林生态系统的 \bar{A} 高于草地和农田生态系统。



3.2 青藏高原生态系统保持土壤的经济价值

根据公式(6)以及各生态系统的 A_c ,可以计算每种类型生态系统土壤保持量。结果显示,青藏高原农田、草地、森林、湿地生态系统总面积为 $1.49 \times 10^8 \text{hm}^2$,其土壤保持总量为 $3.77 \times 10^8 \text{t/a}$ (表4)。根据土壤保持的数量以及公式(7)、(8)和(9),计算了青藏高原土壤保持的经济价值(表4)。

3.2.1 保持土壤养分的经济价值 土壤侵蚀导致土壤中N、P和K的损失,因此土壤需要施加更多的化学肥料,所以青藏高原生态系统减少土壤养分的经济价值可以由化学肥料的价格、保持的土壤量和土壤养分含量计算得到。

青藏高原土壤中养分含量为:碱解氮154.6 mg/kg、速效磷12.0 mg/kg、速效钾232.4 mg/kg^[13]。其换算为硫酸铵、过磷酸钙和氯化钾的系数分别为:4.762、3.373和1.667^[22]。因此青藏高原生态系统保持土壤中养分以硫酸铵、过磷酸钙和氯化钾形式的数量分别为:

$2.77 \times 10^8 \text{t}$ 、 $1.52 \times 10^8 \text{t}$ 和 $1.46 \times 10^8 \text{t}$ 。据农业部土肥处统计,2000年由的硫酸铵、过磷酸钙和氯化钾的市场价格分别为750RMB/t、398RMB/t和1054RMB/t。由此得到青藏高原生态系统保持土壤养分的总经济价值为 $3.68 \times 10^8 \text{RMB/a}$ 。

3.2.2 减少废弃土地的经济价值 土壤侵蚀导致表土的损失,最终使其成为废弃土地。根据种植业、林业和牧业的机会成本,运用公式(8)对青藏高原耕地、林地和草地生态系统保护土壤的经济价值进行计算,沼泽地也以牧业的机会成本计算。

青藏高原平均土壤容重为 1.25t/m^3 ,根据2001年青海统计年鉴,2000年种植业、林业和牧业的机会成本分别为2798RMB/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)、488RMB/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)和96RMB/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[23]。青藏高原生态系统减少废弃土地的经济价值合计为 $5.92 \times 10^8 \text{RMB/a}$ 。

3.2.3 减少泥沙淤积的经济价值 湖泊、水库和河流的泥沙淤积会导致其容量的减少。在此我们以蓄水成本,即水库工程费用,作为机会成本,评价生态系统减少泥沙淤积的经济价值。

青藏高原生态系统保持的土壤总量(QSC)为 $3.77 \times 10^8 \text{t/a}$,取平均土壤容重为 1.25t/m^3 ,同时我国 1m^3 库容的水库工程费用为0.67RMB,由此得到青藏高原生态系统减少泥沙淤积的经济价值为 $2.00 \times 10^8 \text{RMB/a}$ 。

3.3 青藏高原生态系统土壤保持功能经济价值空间分布

本文将青藏高原生态系统分为4种类型和27种亚类型。不同类型生态系统的空间分布、地形地貌、土壤性质、植被覆盖率等等都不尽相同,所以其生态系统土壤保护经济价值的强度也不同(图3)。青藏高原农田生态系统主要分布在东南部横断山区和东喜马拉雅山地南翼的河谷地区、西藏—江四河(雅鲁藏布江、

图2 青藏高原不同生态系统单位面积土壤侵蚀(现实、潜在)与土壤保持量

Fig.2 The quantities of soil erosion (actual, potent) and soil conservation of ecosystems in QTP

A_a 为单位面积现实土壤侵蚀量; A_p 为单位面积潜在土壤侵蚀量; A_c 为单位面积土壤保持量 A_a is the quantity of the actual soil erosion per hectare; A_p is the quantity of the potent soil erosion per hectare; A_c is the quantity of the soil conservation per hectare

- 1: TSDBF; 2: LMGLD; 3: TDSGLD; 4: PFLD; 5: TDSGLD; 6: ADSGLD; 7: TMECF; 8: BVWLD; 9: IFLD; 10: AMSGLD; 11: WTGLD; 12: NIFLD; 13: TMSGLD; 14: ASGLD; 15: STTECF; 16: TSGLD; 17: TREBLF; 18: STEBLF; 19: WSTGLD; 20: TSMDLF; 21: STSEBF; 22: STTMECF; 23: TMMGLD; 24: TEBRLF; 25: STLDDBBMF; 26: TSTGLD; 27: AMGLD

表 4 青藏高原土壤保持的数量及其经济价值
Table 4 The amounts of soil conservation in QTP and economic value

	土壤保持量 Amounts of soil conservation (10 ⁶ t/a)	经济价值 Economic value			总价值 Total value (10 ⁶ RMB/a)
		土壤肥力保持 Protection of soil fertility (10 ⁶ RMB/a)	废弃土地减少 Reduction of soil disuse (10 ⁶ RMB/a)	土壤沉积减少 Decrease of soil deposit (10 ⁶ RMB/a)	
FLD	22.97	22.42	10.25	12.29	44.97
IFLD	12.78	12.48	5.69	6.83	25.00
NIFLD	10.09	9.85	4.51	5.41	19.77
PFLD	0.1	0.1	0.04	0.05	0.19
GLD	156.37	152.65	2.21	83.06	237.91
LMGLD	0.46	0.45	0.01	0.25	0.71
AMSGLD	5.1	4.98	0.08	2.73	7.79
AMGLD	44.81	43.71	0.62	23.77	68.11
ASGLD	16.37	15.98	0.23	8.69	24.90
ADSGLD	1.36	1.33	0.02	0.73	2.07
WTGLD	1.67	1.63	0.03	0.9	2.56
WSTGLD	13.71	13.38	0.19	7.29	20.86
TSTGLD	12.35	12.06	0.19	6.62	18.87
TMSGLD	3.68	3.6	0.06	1.97	5.63
TSDGLD	0.35	0.34	0.005	0.19	0.53
TSGLD	18.61	18.17	0.27	9.91	28.35
TDSGLD	1.18	1.15	0.01	0.63	1.79
TMMGLD	36.72	35.85	0.51	19.39	55.76
F	196.82	192.14	14.01	104.66	310.81
TMECF	1.39	1.36	0.1	0.74	2.20
TSDBF	0.03	0.03	0.002	0.02	0.05
TSMDLF	7.97	7.78	0.6	4.27	12.65
TEBRF	2.17	2.12	0.16	1.16	3.44
FREBLF	12.96	12.65	0.97	6.9	20.53
STTECF	21.3	20.79	1.51	11.31	33.61
STTMECF	47.05	45.93	3.28	24.95	74.16
STEBLF	19.78	19.3	1.41	10.52	31.23
STLDBEBMF	48.7	47.54	3.42	25.86	76.82
STSEBF	35.47	34.64	2.55	18.92	56.11
WLD	0.87	0.85	0.01	0.46	1.32
BVWLD	0.87	0.85	0.01	0.46	1.32
Sum	377.03	368.06	26.48	200.47	595.01

拉萨河、年楚河、尼洋曲河、帕隆藏布河)和青海河湟谷地(黄河谷地、湟水谷地、大通河谷地)以及藏西北河海西柴达木等高寒和暖性荒漠地区的绿洲农业区^[9]。其单位面积保持土壤养分的经济价值估计为 219 RMB/(hm²·a),这与 Pimentel 等估计的美国 1.6×10⁹ hm² 的农田每年养分损失的经济价值为 2×10¹⁰ US\$*(相当于 103.75 RMB/(hm²·a))^[5]相差不大。青藏高原森林生态系统以寒温性的针叶林为主,主要分布在高原的东南部,包括川西、西藏东部、甘南、青海的东部和云南西北部。此外,在喜马拉雅山南坡、藏东南和横断山的南坡高山峡谷的下部和低山还分布着少量的热带雨林、季雨林及亚热带常绿阔叶林^[9]。青藏高原森林生态系统保持土壤的经济价值估计为 649 RMB/(hm²·a),这与 Costanza 等^[24]估计的全球森

* 1US\$ = 8.3 yuan

林生态系统土壤侵蚀控制、土壤形成的经济价值 10^6 US \$ / (hm² · a) (相当于 879.8 RMB / (hm² · a)) 比较接近。青藏高原的草地生态系统从青藏高原东部的亚高山针叶林带以上、祁连山北部等地区的高寒草甸, 到高原东北部的湟水流域的温性草原和西部以及祁连山、昆仑山的高寒草原, 分布极为广泛^[9]。该地区草地生态系统土壤保持的经济价值估计为 517 RMB / (hm² · a), Costanza 等估计的草地生态系统土壤侵蚀控制和土壤形成的经济价值为 30 US \$ / (hm² · a) (相当于 249 RMB / (hm² · a))^[21]。由于计算方法、数据资料等等的差异, 这种差距在所难免。

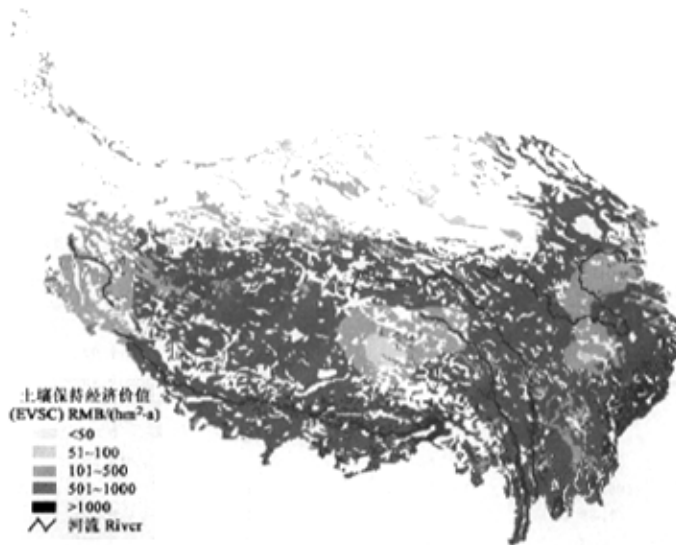


图3 青藏高原生态系统土壤保持经济价值空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of economic values of soil conservation (EVSC) by ecosystems in QTP

以上讨论均是该类型生态系统土壤保持功能经济价值的均值, 然而由于地形地貌、土壤质地、气候等因素空间变异性的存在, 同一类型生态系统土壤保持的经济价值也存在很大差异, 如: 分布于高原南缘和东南部地区的森林生态系统, 由于地形地貌、土壤和水热条件的特殊性质, 其单位面积土壤保持的经济价值可以达到 1000 RMB / (hm² · a) 以上。

4 结论和讨论

青藏高原土壤保持的经济价值估计为 5.95×10^8 RMB/a, 占西藏和青海两省 2000 年种植业、林业和牧业收入的 6.17%。然而青藏高原生态系统土壤保护功能仅仅是全部生态服务功能的一小部分, 其它生态服务功能的经济价值肯定比土壤保护的经済价值高, 可见青藏高原生态系统服务功能经济价值非常巨大, 对当地人类福利有巨大贡献, 而且不能被人类手段替代。虽然人们不能从中直接得到利益, 但是毫无疑问种植业、林业和牧业都是建立在当地生态系统服务功能的基础上的。假如没有森林、草地、农田和湿地的植被覆盖, 为了得到相同的效应, 人们必须至少分别花费 395.66 RMB / (hm² · a), 316.85 RMB / (hm² · a), 218.57 RMB / (hm² · a) 和 117.4 RMB / (hm² · a)。而且由于青藏高原的特殊地位以及今后经济的发展, 其生态系统服务功能将会发挥更大的作用, 而且其经济价值还将上升。所以在决策过程中, 需要加强对生态系统服务功能的保护, 特别重视对受损生态系统服务功能的恢复。

References:

- [1] Wischmeier W H and Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—A guide to conservation planning.

- Agriculture Handbook*, 1978, USDA, 537.
- [2] Liu G C, Luo Z P and Zhang X W. The soil erosion of hill region of Sichuan province and definition of P. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 7(2): 41~44.
- [3] Ma Z Z. A discussion of ways to estimate of the factors value of USLE with satellite images. *Soil and Water Conservation in China*, 1989, (3), 24~27.
- [4] Mou J Z and Meng Q M. Primary study on forecast ways of soil erosion by rainfall. *Soil and Water Conservation in China*, 1983(6), 23~27.
- [5] Pimentel D *et al.* Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefit. *Science*, 1995, 267: 1117~1123.
- [6] Ouyang Z Y, Wang X K, *et al.* A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5), 607~613.
- [7] Xiao H, Ouyang Z Y, *et al.* The spatial distribution characteristics and eco-economic value of soil conservation service of ecosystems in Hainan Island by GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 552~558.
- [8] Zhang Y L, Li B Y, *et al.* A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, 21(1), 1~8.
- [9] Li W H, Zhou X M eds. *Ecosystems of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Approach for Their Sustainable Management*. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1998. 15~18.
- [10] Sun B P, *et al.* Application of USLE in Loess Plateau Gully Area in Xiji County. In: CAS ed. *Collection of study on water and soil conservation in Northwest of Water Conservancy Department*, 1990, 12: 50~103.
- [11] Wang W Z, Jiao J Y, *et al.* Study on rainfall Erodibility in China(I). *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4):5~18.
- [12] Wang W Z, Jiao J Y, *et al.* Study on rainfall Erodibility in China (II). *Journal of Soil Erosion and Soil Conservation*, 1996, 2(1): 29~39.
- [13] Renard K G, Foster G R, *et al.* Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation. *Agriculture Handbook*, USDA, 1996. 703.
- [14] LMBTP (Land Management Bureau of Tibet Province) ed. *Land Resource in Tibet Province*. Beijing: Science Press, 1994.
- [15] Wang W Z, Jiao J Y. Quantitative Evaluation on Factors Influencing Soil Erosion in China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996, 16(5): 1~20.
- [16] Yang Z S. A Study on Erosive Force of Rainfall on Sloping Cultivated Land in the Northeast Mountain Region of Yunnan Province. *Scientia Geographical Sinica*, 1999, 19(3): 265~270.
- [17] Yu S X, Wang N, *et al.* Applications of GIS in Soil Erosion Research. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(3): 20~23.
- [18] Guo Z, Xiao X, Gan Y, Zheng Y. Ecosystem functions, services and their values——a case study in Xingshan County of China. *Ecological Economics*, 38:141~154.
- [19] Li, Q Y, Jiang S Q, *et al.* Determination of Surface Erosion of the Small Watersheds in the Hilly Area of Purple Soils in the Upper Reaches of the Yangtze River. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1995, 12(1): 51~56.
- [20] Deng, X G. Analysis of Soil Erosion in Jinsha River Basin and Influences of Human Activities. *Environment in Sichuan*, 1997, 16(2): 47~51.
- [21] Liu G Q, Liu, Y G. Study on the Ecological Efficiency of Natural Forest in Datong County. *Science and Technology of Agriculture and Forestry in Qinghai Province*, 1998, (2): 21~22.
- [22] Yang Z S, Xie Y Q. The Calculational Methods and Regional Characteristics of Direct Economic Loss of Soils Erosion in Yunnan Province. *Journal of Yunnan University*, 1994, 16(Supp. 1): 99~106.
- [23] Statistics Bureau of Qinghai Province ed. *The statistical yearbook of Qinghai Province*. Beijing: Statistical Press of China, 2001.

- [24] Constanza R. *et al* 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 253~260.

参考文献:

- [2] 刘刚才, 罗治平, 张先婉. 川中丘陵区土壤土壤侵蚀及其 P 值的确定. *水土保持学报*, 1992, 7(2): 41~44.
- [3] 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨. *中国水土保持*, 1989, (3): 24~27.
- [4] 牟金泽, 孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失预报方法的初步研究. *中国水土保持*, 1983, (6): 23~27.
- [6] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607~613.
- [7] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 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. *生态学报*, 2000, 20(4): 552~558.
- [8] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1~8.
- [9] 李文华, 周兴民主编. 青藏高原生态系统及优化利用模式. 广州: 广东科技出版社, 1998. 15~18.
- [10] 孙保平等. USLE 在西吉县黄土丘陵沟壑区的应用. *中国科学院, 水利部西北水土保持研究所集刊*, 1990, 12: 50~103.
- [11] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(I). *水土保持学报*, 1995, 9(4): 5~18.
- [12] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(II). *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 29~39.
- [14] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土壤资源. 北京: 科学出版社, 1994.
- [15] 王万中, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. *水土保持通报* 1996, 16(5): 1~20.
- [16] 杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究. *山地学报*, 1999, 19(3): 265~270.
- [17] 于书霞, 王宁, 朱颜明, 等. 基于地理信息系统的土壤侵蚀研究. *水土保持通报*, 2001, 21(3): 20~23.
- [19] 李青云, 蒋顺清, 孙厚才. 长江上游紫色土丘陵区小流域地面侵蚀量的确定. *长江科学院院报*, 1995, 12(1): 51~56.
- [20] 邓贤贵. 金沙江流域水土流失与人类活动影响分析. *四川环境*, 1997, 16(2): 47~51.
- [21] 刘国强, 刘远光. 大通县天然林生态效益的研究. *青海农林科技*, 1998, (2): 21~22.
- [22] 杨子生, 谢应齐. 云南省土壤侵蚀损失直接经济价值计算方法和区域特征. *云南大学学报*, 1994, 16(Supp. 1): 99~106.
- [23] 青海省统计局. 青海统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2001.