太湖丘陵地区典型坡面土壤侵蚀与养分流失*

曹　慧　　杨　浩　　赵其国

（中国科学院南京土壤研究所，南京 210008）

提　要　建立了基于^{137}Cs技术的土壤侵蚀的定量模型，采用有关土壤养分流失方程，对太湖地区典型坡面的土壤侵蚀和土壤养分流失进行初步估算．结果表明，研究地区的典型坡面存在着一定的土壤侵蚀，林地各个剖面点的土壤侵蚀模数平均为 1313.6 t/(km^2·a)，而菜地所在的微地貌部位土壤侵蚀更达 5185.68 t/(km^2·a)．土壤侵蚀主要受植被覆盖和人为耕作的影响，侵蚀量的大小排序为坡麓菜地＞坡中马尾松林地＞竹林地＞坡顶马尾松林地．选择的典型坡面存在着一定的土壤养分流失，林地有机质、全氮、全磷与全钾的平均流失量亦分别高达 28.29，1.38，0.35 和 16.76 t/(km^2·a)，养分流失量大的地貌部位的土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量低，而土壤侵蚀微弱的坡顶林地土壤养分含量较高．菜地土壤养分流失量最大，但由于施肥作用，土壤养分含最高．太湖丘陵地区的土壤侵蚀与养分流失不仅关系到本地区土壤肥力的退化，并对太湖水体环境质量的产生影响．

关键词　太湖地区　^{137}Cs　土壤侵蚀　养分流失

分类号　S157.1

土壤侵蚀是土地退化的主要原因，据统计，全球土壤退化面积达 1965×10^4km^2，而侵蚀退化占总退化面积的 84%[1]．土壤侵蚀的直接后果是它降低了土壤中有机质和各种营养元素的含量，破坏了土体结构，并且随着土壤的流失而污染水体．传统的研究方法主要通过监测小流域出口的泥沙含量计算总的产沙量，或者在不同地貌部位设置流域小区进行监测，通过建立的侵蚀数学模型估算小流域的泥沙来源．上述方法十分繁锁，所建立的数学模型缺乏通用性[2]．^{137}Cs 是核爆破的产物，其半衰期为 30 年．^{137}Cs 进入大气后随着大气环流运动，并通过干湿沉降到达地表，被土壤中的粘土矿物和有机质强烈吸附，而通过化学迁移和作物吸收导致的^{137}Cs 损失可忽略不计[3]．Rogowski 和 Tamura 最早指出，对于较小的侵蚀小区而言，^{137}Cs 在土壤中的再分配和侵蚀小区土壤的运移之间呈紧密相关[4]．因此，土壤侵蚀和沉积作用是导致土壤中^{137}Cs 的迁移和再分配的主因，这是土壤^{137}Cs 能示踪土壤侵蚀作用的先决条件．国内外不同地区的研究已经证明，它是研究土壤侵蚀、泥沙运移和堆积的一种很好的示踪源，具有简便、快速、准确的操作特点[5～7]．

太湖地区总流域面积为 36500 km^2，其中丘陵约占总面积的 20%．这一地区地形起伏较大，降雨量也较丰沛，并且季风性气候特征使该地区降雨比较集中、降雨强度较大；此外，近年来由于产业结构的调整，土地利用呈现出高强度开发的特点，土壤侵蚀十分严重．但长期以来，对长江三角洲地区土壤侵蚀重视不够、研究不足，事实上，太湖地区的土壤侵蚀不仅

* 国家自然科学基金重点项目(49831070)和国家自然科学基金项目(49973027)联合资助．
收稿日期：2001－06－06；收到修改稿日期：2002－01－30．曹慧，男，1966 年生，博士，助理研究员．

造成到土壤肥力质量的退化，也与该地区水体质量密切相关．研究太湖地区土壤侵蚀的泥沙来源，估算土壤侵蚀的数量和养分流失，是促进该地区农业与环境可持续发展的基础．

1 土壤样品采集与分析

1.1 研究的典型小流域概况

典型小流域位于江苏省吴县市旺山村，该村土地面积为 646.34hm^2，其中，旱地 67.3hm^2，林地 318.5hm^2，两者占土地总面积的 59.69%．采样点为七子山向南延伸的余脉，坡顶海拔高度 165m，相对高度 120m．土地利用类型从坡麓到坡顶依次为旱地、竹林和马尾松林地，利用时间 20 年以上．土壤母质为石英砂岩残积、坡积物．土壤类型坡顶是砾质薄层红黄土，坡度 10°～25°，土层浅薄并夹有较多砾石；坡中为砾质中层红黄土，土层厚约 60cm；坡麓是厚层红黄土，砾石含量明显减少．

1.2 土壤样品的采集与分析

考虑到土壤类型和土地利用方式的规律性，采样点按地貌部位从坡顶到坡麓大致沿直线分布．土壤样品按剖面深度采集，即采集 0～5cm、5～10cm 和 10～20cm 三个土样，但最高和最低采样点分 4 层取样，样品共计 26 个．样品采集后，除去石块、根系等杂物，风干后研磨并过 60 目筛，每个土样均为 300g．除去的石块分别称重，以计算土壤和石块总的密度．本实验中土壤中的^{137}Cs 采用美国 ORTEC 公司生产的 GEM－25210 高纯锗 γ 谱议测量，土壤养分含量的采用化学测定方法[8]．

2 土壤侵蚀与养分流失的计算模型

2.1 土壤侵蚀的^{137}Cs 计算方法[9]

某一剖面点，^{137}Cs 在土壤中的线性分布函数可由各样点^{137}Cs 含量与土壤深度拟合，用公式表示如下：

$$Cs = a - b \times H$$

上式中，Cs 表示^{137}Cs 在土壤剖面中的浓度(Bq/kg)，H 为土壤深度(m)，a 和 b 系数．当 Cs 为 0 时，H 等于 a/b，表示^{137}Cs 在土壤剖面中的最大分布深度；当 H 为 0 时，Cs 等于 a，表示土壤表面最大的^{137}Cs 含量．则^{137}Cs 在每 1m^{2}面积土壤中的^{137}Cs 含量 Y 为：

$$Y = 10000a^2 \times D_t/2b$$

式中，D_t为土壤和砾石的总密度．D_t可由土壤密度(D_1)、砾石密度(D_2)、样品中土壤重量(G_1)和砾石重量(G_2)求出，即：

$$D_t = (G_1 + G_2)/(G_1/D_1 + G_2/D_2)$$

设某一样点的土壤侵蚀深度为 h，则表示该点每年每平方公里土壤侵蚀量的侵蚀模数(E_R)可用下列公式表示：

$$E_R = 10^6 \times h \times D_t/(N - 1954)$$

其中，N 为取样年份，h 可由某一样点^{137}Cs 含量与标准剖面点的土壤^{137}Cs 含量比较后求得，即：

$$Y_0 = 10000 \times D_t \times (a/b + h) \times (a + b \times h)/2$$

2.2 土壤养分流失量的估算

土壤养分流失与土壤性质密切相关，而以往由于对侵蚀泥沙中养分含量及其来源的表

土中养分含量的关系研究较少,养分流失量的估测是直接通过土壤侵蚀量计算的,其结果可能会低估养分的流失总量. 本研究采用蔡崇发等人建立的养分流失预测模型,把侵蚀泥沙与土壤养分的关系结合起来[10].

$$N = 0.001 \times C \times E_R \times F$$

式中,C 是表土养分含量,E_R为土壤流失量,F 表示泥沙对表土的富集度,N 为侵蚀土壤所带走的养分含量(t/(km^2·a)),0.001 为单位转换系数,将 kg 转化为 t. 由于泥沙流失以粒级细小的颗粒为主,而本地区丘陵小流域属于砾质红黄土,粘粒含量相对较小,因而对上述富集度 F 进行了部分修正.

3　结果与讨论

3.1 ^{137}Cs 在不同采样点的剖面分布与基准值的确定

总的来说,^{137}Cs 在太湖丘陵地区土壤中的剖面分布深度不大,一般分布在 20cm 以内. 这与该地区土壤中有机质和粘粒对^{137}Cs 的强烈吸附能力有关. 土壤中^{137}Cs 含量与采样深度之间具有良好的线性关系,且随着采样深度的增加而降低.

基准点的选择对于^{137}Cs 基准值的可靠性相当重要,它直接影响到土壤侵蚀模数计算结果的准确性. 一般而言,基准点应是历史上基本未受到侵蚀或沉积的地点,国内外现有的这方面研究常把大面积的平坦山顶选作基准点. 本研究中位于坡项的采样点具有上述人为干扰较小、地形平坦、面积较大的特点,其^{137}Cs 在剖面中的积累含量为 2385.08 Bq/m^2,据此,长江三角洲丘陵地区^{137}Cs 基准值约为 2400 Bq/m^2.

3.2 ^{137}Cs 对土壤侵蚀量的估算

从表 1 可以看出,不同地貌部位土壤中^{137}Cs 含量随植被覆盖、土壤类型、土地利用方式以及坡度发生明显分异,其中^{137}Cs 最大值 2507.83 Bq/m^2,最小值仅为 704.49 Bq/m^2,最大值是最小值的 3.56 倍. 但土壤中^{137}Cs 含量最大值并未出现在坡度最小的坡顶,最小值也不位于植被覆盖良好的竹林地,显示出土壤侵蚀影响因素的多样性.

表 1　不同地貌部位的坡度及其^{137}Cs 含量

Tab. 1 The amount of ^{137}Cs in soil of different landforms

地貌部位	样品数目	土地利用方式	土壤类型	平均坡度	^{137}Cs 含量(Bq/m^2)	侵蚀模数(t/(km^2·a))
坡顶	7	稀疏马尾松林	砾质薄层红黄土	1.5°	2283.12	242.93
坡中	9	稀疏马尾松林	砾质中层红黄土	10.0°	1557.48	2698.83
坡麓	6	竹林	砾质中层红黄土	17.5°	2507.83	999.04
坡麓	4	菜地	厚层红黄土	2.0°	704.49	5185.68

侵蚀模数反映的是单位时间、单位面积条件下的土壤侵蚀数量. 同一植被类型条件下,例如坡顶和坡中的稀疏马尾松林地,土壤侵蚀随地形坡度而变化,坡顶部位的土壤侵蚀不到坡中的 1/10. 同一土壤类型条件下,植被对土壤侵蚀模数的影响大于坡度,这从竹林与马尾松两者的侵蚀模数的比较中可以看出. 竹林覆盖条件下土壤的侵蚀量要远小于马尾松林地,这是因为竹林的根系比较发达,能有效地防止土壤流失;并且竹林中的枯枝落叶等地面覆盖较厚,可使来源于较高地貌部位的泥沙在此堆积.

耕作土壤菜地的土壤侵蚀模数 5185.68 t/(km^2·a),这与菜地土壤缺少植被覆盖密切

相关，且每年的平整、翻耕加剧了表土的流失；而非耕作土壤的平均侵蚀模数为 1211.49 t/(km^2·a). 耕作土壤侵蚀模数远远大于非耕作土壤这一事实表明，影响本地区土壤侵蚀的主要因素是各种人为因素.

3.3 不同地貌部位土壤的养分流失

以土壤养分流失的估算模型为基础，对不同地貌部位和植被覆盖条件下的土壤养分的流失量进行了计算，结果见表 2.

不同地貌部位的土壤养分流失量随相应地貌部位的土壤侵蚀模数的变化而变化，较大的土壤侵蚀模数代表的是较强烈的土壤养分流失，土壤养分流失量从大到小的排序为：坡麓菜地＞坡中马尾松林地＞竹林地＞坡顶马尾松林地. 研究的典型坡面，林地有机质、全氮、全磷与全钾的平均流失量亦分别高达 28.29，1.38，0.35 和 16.76 t/(km^2·a)，土壤养分的流失量与该地貌部位土壤养分含量呈明显的负相关，即在林地中土壤养分流失量小的坡顶土壤的养分含量较高，而坡中的马尾松林地由于强烈的土壤侵蚀，土壤养分含量最低. 菜地土壤的养分流失量虽然最大，但由于人为的补偿作用，土壤的养分含量反而最高. 土壤养分的流失，直接造成侵蚀模数大的地貌部位土壤养分含量土壤养分含量下降，其明显的异地效应对太湖的淤积和水体质污染也会产生深刻影响.

表 2 不同地貌部位土壤的养分流失 单位：t/(km^2·a)

Tab. 2 The amount of soil nutrients loss on different landforms

地貌与土地利用方式	富集度 F	有机质流失量	全氮流失量	全磷流失量	全钾流失量
坡顶稀疏马尾松林	1.35	6.62	0.27	0.09	3.58
坡中稀疏马尾松林	1.40	57.75	2.68	0.69	33.36
坡中竹林	1.00	27.11	1.20	0.27	13.33
坡麓菜地	1.15	194.06	11.95	6.27	78.72

4 结论

基于^{137}Cs 技术建立了土壤定量侵蚀模型，采用有关的土壤养分流失方程，对太湖丘陵地区典型坡面的土壤侵蚀模数和养分流失进行了初步估算，获得了以下结论：

(1)太湖丘陵区典型小流域的不同利用方式条件下，各地貌部位均存在着一定的土壤侵蚀，其中耕作土壤菜地的侵蚀量大于非耕作的林地土壤，且植被覆盖良好的竹林地小于稀疏马尾松林，显示植被覆盖与耕作方式对土壤侵蚀的强烈影响.

(2)采用相应的土壤养分流失方程，计算出不同地貌部位的土壤养分流失量. 总体而言，太湖丘陵区不同地形坡位的土壤养分流失量存在着较大差别，研究中小流域的平均氮素流失虽然小于水田氮素损失量[11,12]，但在某些受人为因素影响强烈的地貌部位已十分严重，土壤养分流失明显引起该地区土壤肥力的降低.

(3)土壤养分流失尤其是 N、P 养分流失对于太湖水质富营养化的贡献以及流失泥沙对太湖的淤积等方面的研究工作是系统认识太湖地区水环境的成因的基础. 但长期以来，对太湖丘陵地区土壤侵蚀的重视不够、研究不足，因此对太湖丘陵地区开展相应土壤侵蚀研究工作，对于减缓太湖丘陵地区土壤肥力退化与非点源污染造成的危害具有重要的现实意义.

参　考　文　献

1 Oldeman L R. The global land degradtion. In: Greenland D J, Szabolcs I, eds. Land resilience and sustainable land use. Wallingford: CAB International, 1994: 29－118

2 Ritchie J C, Spraberry J A, Mchenry J R. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout ^{137}Cs. *Soil Sci Soc Am J*, 1974, **38**: 137－139

3 Ritchie J C, McHenry J R. Application of radioactive fallout ceasium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *J Environ Qual*, 1990, **19**(2): 215－233

4 Rogowski A S, Tamura T. Movement of cesium-137 by run off, erosion and infiltration on the alluvial Captina silt loam. *Health Physics*, 1965, **11**: 1333～1340

5 **杨明义,田均良,刘普灵. 应用**^{137}Cs **研究小流域泥沙来源. 土壤侵蚀与水土保持学报**, 1999, **5**(3): 49－53

6 Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China. *Hydrol Sci J*, 1990, **35**: 267－276

7 **唐翔宇,杨　浩,曹　慧等.** ^{137}Cs **法估算南方红壤地区土霁侵蚀的初步研究. 水土保持学报**, 2001, **15**(3): 4－7, 11

8 **刘光崧等. 土壤理化分析与剖面描述. 北京:中国标准出版社**, 1996

9 **曹　慧,杨　浩,唐翔宇等.** ^{137}Cs **技术对长江三角洲丘陵区小流域土壤侵蚀的初步估算. 水土保持学报**, 2001, **15**(1): 13－15

10 **蔡崇发,丁树文,史志华等.** GIS **支持下三峡库区典型小流域土壤养分流失量预测. 水土保持学报**, 2001, **15**(1): 9－12

11 **李荣刚,夏源陵,吴安之等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量. 湖泊科学**, 2000, **12**(2): 147－153

12 **马立珊等. 江苏太湖水系农业面源污染源及其控制对策研究. 环境科学学报**, 1997, (1): 346－354

Soil Erosion and Nutrients Loss on the Typical Slope in Hilly Region of Taihu Basin

CAO Hui　　YANG Hao　　ZHAO Qiguo

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008 , *P. R. China*)

Abstract

Based on ^{137}Cs technique, a quantitative model for soil erosion has been established, and the amount of soil erosion and nutrients losses have been calculated. The results showed that the average amount of soil erosion of various profiles in forest is 1313.6 t/(km^2 · a), and the erosion in vegetable land is much higher, so there is soil erosion in hilly region of Taihu Basin. The main factors affecting soil erosion are vegetable cover and cultivation, and the sort order of soil erosion amount on different landforms from high to low is as follows: vegetable land＞middle slopping hill with mason pine＞middle slopping upland with bamboo＞top land . The nutrients loss is correlative with soil erosion, and the average loss for organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in forest is 28.29, 1.38, 0.35 and 16.76 t/(km^2 · a), respectively. Therefore, it's time to pay attention to soil erosion in this area, and take some measures to reduce its effect on soil fertilizer and water quality in Taihu Basin.

Key words: Taihu Basin; ^{137}Cs; soil erosion; soil nutrients losses