

新疆库尔勒市土地利用变化对土壤性状的影响研究

陈 浮, 濮励杰, 彭补拙, 包浩生

(南京大学城市与资源学系, 南京, 210093)

摘要: 土地利用与土地覆被变化是全球变化研究的热点问题。在新疆库尔勒市选择土地利用变化后已持续利用 15~20a 的 9 种典型利用方式, 11 个剖面, 与荒漠、原始胡杨林 2 种参照利用方式 3 个标准剖面进行对比分析。结果显示土地利用变化对土壤养分、土壤盐分、土壤侵蚀、土壤水分和土地生产力有明显的影响, 荒漠开垦后土壤养分呈下降趋势, 土壤侵蚀强度也呈下降趋势, 土地生产力与土壤水分含量呈上升趋势。同时发现土壤侵蚀强度与土地生产力呈负相关关系, 土地生产力与土壤水分呈正相关关系。林、草有利于保护干旱区生态环境, 调整土地利用结构, 合理开垦, 加之预防和治理措施在一定程度上可防止或减弱土地退化(荒漠化)进程。

关键词: 土地利用变化; 土壤养分; 土壤水分; 土壤侵蚀; 土地生产力; 库尔勒市

The effect of land use changes on soil conditions in Korla City, Xinjiang

CHEN Fu, PU Li-Jie, PENG Bu-Zhuo, BAO Hao-Sheng (Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China)

Abstract: Land use change may influence a variety of natural and ecological processes, including soil nutrient, soil moisture, soil erosion, land productivity and biodiversity. The 9 typical land use patterns lasted for 15~20 years have been chosen to study the effect of different land use patterns on soil nutrient, soil erosion, soil moisture, saline and so on. We drew conclusions as follows: Firstly, it is clear of the effect of land use change on soil. Land use change results in the decline of soil nutrient and erosion rate, but the increase of land productivity; Secondly, the erosion rate and the rate of vegetation cover is the subtractive correlativity. It reflects the effect of soil erosion on land productivity. It is clear of the positive correlativity between land productivity and soil moisture and explains the role of land surface vegetation to prevent aridity in the northwestern China; Lastly, it is feasible to develop animal husbandry properly in arid region. The topgallant land use pattern is forest and meadow in arid region. The rational land use may prevent or weaken the intensity of soil erosion in a certain extent. Therefore, activities accorded with ecological principal such as readjustment of land use structure, rational reclamation along with adoption of prevention and control measures can reverse land degradation process.

Key words: land use change; soil nutrient; soil moisture; soil erosion; land productivity; Korla City

文章编号: 1000-0933(2001)08-1290-06 中图分类号: S153 文献标识码: A

土地利用变化可引起许多自然现象和生态过程变化, 如土壤养分、土壤水分、土壤侵蚀、土地生产力^[1]、生物多样性和生物地球化学循环等^[2]。因此, 土地利用变化研究对了解区域生态环境乃至全球环境

基金项目: 中英国际合作(SHA0992-259)和国家自然科学基金(49801015)资助项目

本文得到南京土壤研究所赵其国院士的指导, 特此致谢!

收稿日期: 1999-11-30, 修订日期: 2000-04-01

作者简介: 陈 浮(1974~), 男, 江苏射阳人, 博士。主要从事土地利用变化研究。

变化是至关重要的。目前,土地利用变化研究集中于对全球变化的影响及响应,如气候变化、 CH_4 和 N_2O 排放和水文变化^[3~8]。对区域生态演变和自然地理过程的影响及响应研究比较缺乏^[9]。干旱区生态环境相当脆弱,响应敏感。风蚀、缺水、盐渍化、荒漠化等重要过程威胁着农业生产的稳定和安全,不合理的土地利用进一步加剧了土地退化进程^[10]。因此,本研究选择新疆库尔勒市作为研究区域,从时空转变角度分析土地利用变化对土壤养分、土壤盐分、土壤侵蚀、土壤水分和土地生产力的影响,并从景观安全角度分析土地利用变化对生态环境的敏感和适宜的程度。

1 研究区域

库尔勒市地处新疆维吾尔自治区腹心地区,天山支脉霍拉山南麓,塔里木盆地东北缘,东经 $85^{\circ}13'$ 至 $86^{\circ}26'$,北纬 $41^{\circ}11'$ 至 $42^{\circ}14'$,面积 7209.69km^2 ,境内 80% 以上是海拔在 $890\sim 950\text{m}$ 之间的冲积平原,由东北向西南倾斜,平均坡降为 $1/1000\sim 1/2000$ 。本区属于暖温带大陆性干旱气候,年均降水 50.1mm ,年蒸发 2788mm ,平均风速 3.0m/s ,最大风速达 22.0m/s 。年均气温 11.4C ,1 月份平均气温 -8.1C ,7 月份平均气温 26.1C ,极端高温 40.0C ,极端低温 -28.1C , $\geq 10\text{C}$ 积温为 $4273\text{C}^{[11]}$ 。平均侵蚀模数 $3954.06\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})^{[12]}$ 。本区初始土地利用方式是戈壁荒漠和原始胡杨林 *Populus euphratica*,经过近 40a 的开垦,已经形成新的土地利用格局(表 1)。

表 1 1996 年库尔勒市土地利用格局

Table 1 The area and percentage of land use patterns in Korla City in 1996

类型 Type	耕地 Arable land	林地 Forest	天然草场 Meadow	人工草场 Pasture	建设用地 Build-up land	水域 Water	荒漠 Desert
面积($\times 10^5\text{hm}^2$)Area	3.361	5.291	28.159	5.324	1.220	2.03	26.72
比重 Percentage	4.66	7.33	39.06	7.38	1.74	2.81	37.05

2 样本采集与实验方法

本研究选择了库尔勒市的荒漠、人工草地、天然草地、旱地、休闲地、轮作地、废弃地、果园和原始胡杨林等 9 种干旱区典型土地利用形式,分析不同土地利用方式对土壤养分、土壤侵蚀、土壤水分、盐渍化和土地生产力等的影响。根据 1995 年 7 月 15 日至 18 日实地勘察和调查,在新疆库尔勒市哈拉玉宫乡选择已持续利用 15~20a 的田块,用内径 15cm 的不锈钢取样筒垂直打入土层,取出完整土芯(图 1)。

荒漠与原始胡杨林 3 个初始利用方式样品,作为本研究的标准剖面,分别采集于库尔勒市南部沙漠边缘区和孔雀河下游河谷,采样处无农业生产活动干扰。本区土壤颗粒细小,质地比较均一,大部分剖面疏松,采样深度为 90cm 。 $0\sim 30\text{cm}$ 土芯的分层间距为 10cm , $30\sim 90\text{cm}$ 土芯的分层间隔为 20cm ,为不同的测试备用(表 2)。

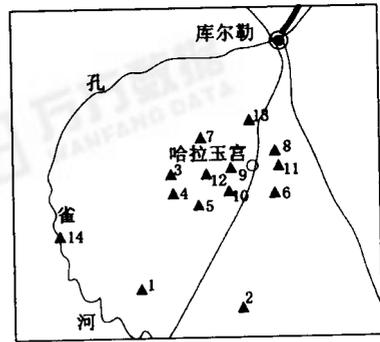


图 1 库尔勒市采样点分布示意图

Fig. 1 The distribution of samples in Korla City

表 2 不同土地利用方式的样品分布与编号

Table 2 The distribution and serial number of samples under different land use

类型 Type	荒漠 Desert	天然草场 Meadow	人工草场 Pasture	旱地 Upland	3a 轮作 Crop rotation	休闲地 Fallow	废弃地 Wasteland	果园 Orchard	原始胡杨林 <i>Populus euphratica</i>
No.	1,2	3,4,5	6,7	8,9	10	11	12	13	14

土芯水分测试采用便携式时域反射测试仪(TDR)分别测定 5cm 、 15cm 、 25cm 、 40cm 、 60cm 、 80cm 和

90cm 等不同深度的土壤水分含量,总共测试了 14 剖面不同深度的土壤水分含量样品 98 个,每个样品测试 3 次,取平均值。土壤养分测试取用 0~20cm 表层土壤,风干、磨碎、过筛(60 目尼龙筛)后,测试全氮、全磷、速效氮、速效磷、速效钾和有机质,具体分析方法是:全氮,半微量开氏法;全磷,硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法;有效氮,碱解扩散法;有效磷,0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;有效钾,1mol/L 碳酸铵浸提-火焰光度法;有机质,重铬酸钾容量法。每个样品均分析 3 次,取平均值。

0~10cm, 10~20cm, 20~30cm, 30~50cm, 50~70cm 和 70~90cm 等 6 个不同深度的土壤样品风干、磨碎、过筛(100 目尼龙筛)后,采用美国 ORTEC 公司生产的高纯锗(Ge)7600 型同轴探测器测试 ^{137}Cs 的 γ 放射性,经 572 型 24 倍前置放大和 ADC 转换器后,再经 S-40 系列 4096 多道分析器。高纯锗(Ge)7600 型同轴探测器探头的灵敏体积为 100cm^3 ,对 ^{60}Co 的 1.33MeV 的射线的能量分辨率为 1.9KeV,峰康比为 50:1,温度漂移 $<0.01\%/C$ 。标准源是加拿大贝德福海洋研究所提供的强度为 1.16Bq/g,重 65.4g。每个样品测重约为 380g,测量时间为 30 000s,为保证测试精度,每个样品均测试 3 次,取平均值。

第一性生产力的直接估算比较困难,本研究采用土壤根量和植被覆盖率代替土地生产力。土壤根系取 0~30cm 表层土样,捡出活根,与土壤分别烘干称重,计算根系含量。根据 1995 年 3 月 15~18 日正午用便携式光度仪测定露天透光率 P_o 和每一个采样点的植被透光率 P_v ,计算不同土地利用类型的植被覆盖率(C):

$$C = (1 - P_v/P_o) \times 100\% \quad (1)$$

为了保证测试精度,每个样点均测试 3 次,取平均值。

4 结果与讨论

图 2 显示不同土地利用方式下土壤养分的变化。根据公式(2)计算各样品的土壤质量指数 $SQI^{[13,14]}$:

$$SQI = \sum WiIi \quad (i = 1 \sim 6), \sum Wi = 100 \quad (2)$$

式中, Wi 为各评价指标的权重, Ii 为评价指标等级分值(1、2、3、4)。 SQI 的最大值 $SQI_m = 400$,这是理想土壤的质量指数值,实际中很难达到这一数值。本研究引入土壤质量指数的目的是为了把各样点不同利用方式下土壤质量与初始利用方式下土壤质量进行对比,量化分析不同利用方式对土壤质量的影响程度。

原始胡杨林土壤质量指数最高,达 240。荒漠 2 个样品的平均值约为 212,经过 15~20a 开垦利用后,土壤质量指数全面下降,土壤质量指数下降幅度分别为天然草场 $<$ 人工草场 $<$ 3a 轮作 $<$ 旱地 $<$ 休闲地 $<$ 果园 $<$ 废弃地,废弃地的土壤质量指数仅为 66。果园土壤质量指数下降很大,除了果树生长削弱地力外,也可能与果园经营粗放,农业投入较少有关。在各样品土壤养分中仅有旱地和休闲地中速效氮含量有所上升,主要原因是农业生产施肥所致。土壤盐分变化较大,天然草场和人工草场均呈下降,轮作地、休闲地、耕地略所上升,果园上升明显,废弃地则上升高达 6~7 倍。这可能与灌溉方式和淋溶作用有关,土地开发利用后一般土壤中盐分呈下降趋势,但是“重灌轻排”引起地下水位上升,导致土壤次生盐渍化而受到废弃。

图 3 显示不同利用方式下土壤水分的变化。通过对 9 个利用方式 14 剖面 0~90cm 的土壤分层取样,3 次测定土壤水分含量,取平均值发现人工草场土壤水分最为充沛,为 17.2%,天然草场和原始胡杨林的水分含量也达 16.4%、15.9%。旱地、3a 轮作和休闲地水分含量约 12.6%、12.0% 和 9.3%。废弃地和果园的水分含量较低,分别为 7.2% 和 6.0%。荒漠土壤水分仅为 2.4%。尽管人工草场、天然草场和原始胡杨林 0~20cm 表层土壤中水分含量大致相同,但是不同利用方式下土壤水分垂直变化相差悬殊,人工草场土壤水分高峰出现最浅,在 20~30cm 之间;天然草场、原始胡杨林、果园次之,土壤水分高峰在 30~40cm 之间;旱地、3a 轮作地、休闲地再次之,土壤水分高峰在 40~50cm 之间,废弃地和荒漠土壤水分高峰出现最深,在 50~70cm 之间。

图 4 显示不同利用方式下土壤侵蚀的变化。本研究借助土壤中 ^{137}Cs 变化反映土壤侵蚀强度和空间分布。由于 ^{137}Cs 伴随大气环流和降水分布于地表,因此,在一定区域内,只要不发生土壤的物理运动(侵蚀、搬运、堆积等), ^{137}Cs 分布值大致相等。首先,根据公式(3)计算各样品点的 ^{137}Cs 强度值,具体如下:

万方数据

$$Cs = \sum_{i=1}^n C_i \times BD_i \times DI_i \times 1000 \quad (3)$$

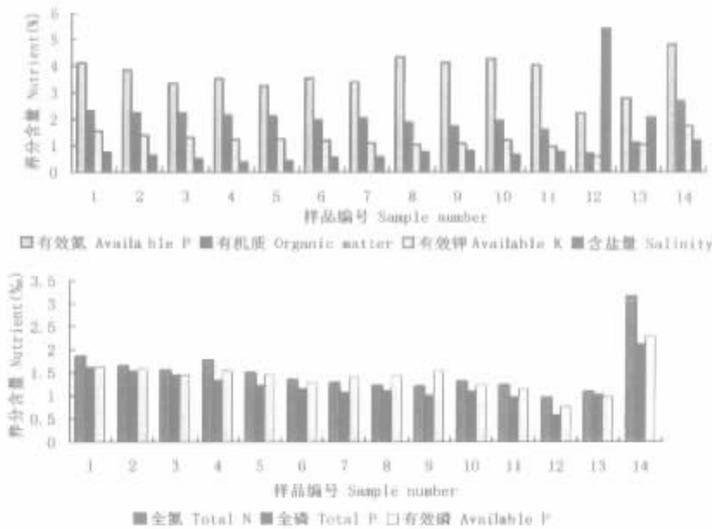


图 2 不同利用方式下土壤养分和盐分变化

Fig. 2 The change of soil nutrient and salinity under different land use in Korla City

式中, C_s 为样品单位面积 ^{137}Cs 的含量 (Bq/m^2), i 为采样层数序号, n 为采样层数, C_i 为采样层数序号 i 的 ^{137}C 浓度 (Bq/kg), BD_i 为采样层数序号 i 的土壤容重值 (Mg/m^3), DI_i 为为采样层数序号 i 的土壤深度值 (m); 其次, 建立 ^{137}Cs 强度值与土壤侵蚀强度之间的相关模型。许多研究表明本研究区土壤侵蚀的空间差异与 ^{137}Cs 的空间分布呈线性相关关系^[12,15~18], 则可根据公式(4)计算样点 ^{137}Cs 含量的变化率:

$$C_{sn} = (C_{ss} - C_{sr}) / C_{sr} \quad (4)$$

式中 C_{sn} 为样品所在区 ^{137}Cs 含量的变化率, 正值说明该区堆积, 负值说明该区侵蚀; C_{ss} 为样品 ^{137}Cs 的强度值 (Bq/m^2); C_{sr} 为标准剖面 ^{137}Cs 的强度值 (Bq/m^2)。最后, 根据土壤侵蚀的空间分布与 ^{137}Cs 含量呈线性相关, 建立土壤侵蚀空间分布模型(公式 5):

$$S_{nr} = C_m \times BD \times DI \times 1000 / T \quad (5)$$

式中, S_{nr} 为样品所在区年平均侵蚀模数 ($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); BD 为样品所在区土壤容重 (mg/m^3); DI 为采样间距

(cm); T 为本研究区发现 ^{137}Cs 含量最高值的年份与采样时间所在年差值的绝对值。本研究采样时间为 1995 年, 国内外研究认为 1964 年禁止大气核试验是土壤中 ^{137}Cs 出现的峰值, 则 $T = 31\text{a}$ ^[19,20]。根据公式(5)可以计算出各样品所在区的土壤侵蚀模数, 荒漠区土壤侵蚀量高达 $5987.21\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 废弃地次之, 为 $5527.19\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 休闲地、旱地、3a 轮作地再次之, 分别为 $3833.29\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $3537.29\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $3604.88\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 果园、天然草地土壤侵蚀分别为 $3215.56\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $3171.31\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; 人工草场和原始胡杨林的土壤侵蚀最低, 分别为 $1973.44\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $1647.78\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。这表明农业生产活

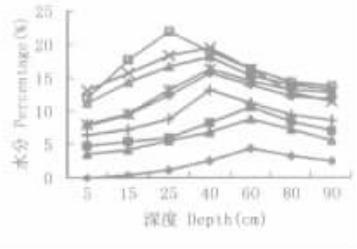


图 3 不同利用方式下土壤水分的垂直变化

Fig. 3 The change of soil moisture with depth under different land use in Korla City

- ◇—荒漠 Desert
- 人工草场 Pasture
- △—天然草场 Meadow
- ×—胡杨林 *Populus euphratica*
- *—旱地 Upland
- ◆—轮作地 Crop rotation
- |—休闲地 Fallow
- 废弃地 Wasteland
- ▲—果园 Orchard

动在一定程度上阻止或减弱了土壤侵蚀强度,人工草场和原始胡杨林的土壤侵蚀量仅属于 1991 年水电部土壤侵蚀强度分级是轻度侵蚀($<2500t/(km^2 \cdot a)$),绝大部分农牧区属于中度侵蚀,但是荒漠和废弃地的土壤侵蚀则严重得多,达到强度侵蚀范围($>5000t/(km^2 \cdot a)$)。

图 5 显示不同利用方式下土地生产力的变化,人工草场土壤根系含量最高,达 $2.21g/kg$,胡杨林、天然草场次之,分别为 $2.05g/kg$ 、 $1.58g/kg$,旱地、3 年轮作地、休闲地再次之,分别为 $1.01g/kg$ 、 $1.08g/kg$ 、 $0.88g/kg$,废弃地为 $0.30g/kg$,荒漠最低,仅为 $0.23g/kg$ 。原始胡杨林的植被覆盖率最高,达 94.0% ,人工草场、天然草场次之,分别为 90.0% 、 74.0% ,旱地、3a 轮作地、休闲地再次之,分别为 49.0% 、 54.0% 、 42.0% ,废弃地为 16.0% ,荒漠的植被覆盖率最低,仅为 10.0% 。借助 Excel 软件,把土壤根系、植被覆盖率与土壤侵蚀模数进行相关性分析,相关系数分别为 -0.9377 和 -0.9289 ,这显示两者之间是显著负相关。同时,将土壤水分与土壤根系和植被覆盖率进行相关性分析,相关系数分别为 0.8642 和 0.9226 ,说明两者之间存在着正相关关系,植被覆盖率与土壤水分之间更为显著相关。反映植被覆盖对土壤水分保持有着重要作用,因此,西北地区防止干旱化重要举措是必须努力保持地表植被。

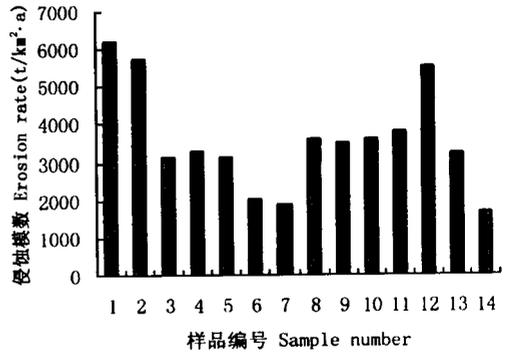


图 4 不同利用方式下土壤侵蚀变化
Fig. 4 The erosion rate change in different land use

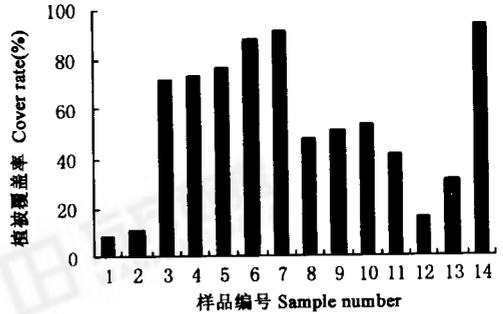
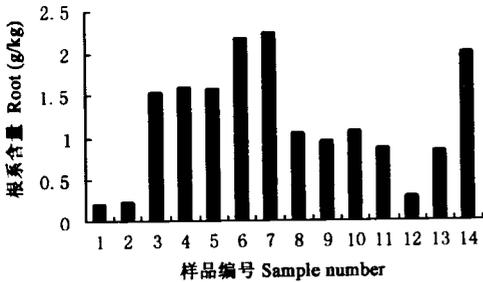


图 5 不同利用方式下土地生产力变化

Fig. 5 The change of land productivity under different land use

本区初始利用方式是戈壁荒漠,且采集样品的区域范围较小($360hm^2$),土壤类型属于棕漠土,1995 年借助地理信息系统(GIS)与地统计学(Geostatistic)的空间分析功能评价了土地质量,土壤养分等因子的空间分异特征极不明显,性状均一^[11]。因此,从时空转换角度出发,当前土地利用空间格局可以看作土地利用方式在时间上的转变。本次研究以荒漠和原始胡杨林作为参照系,分析土地利用变化对土壤性状的影响。

①戈壁荒漠生态环境十分脆弱,土地利用变化导致土壤质量下降。经 15~20a 的开垦利用,土壤质量指数均存在着不同程度的下降,各样品中仅有旱地、3a 轮作地的有效氮有所上升,这是人工施肥的缘故。天然草地土壤质量指数下降最少,而果园土壤质量指数下降最多,在一定程度上果园是不利于保护土壤养分的。原始胡杨林无论是土壤水分保持,还是防止土壤侵蚀均有明显作用,可以认为是该区保护生态环境的最有效途径;②土地利用变化导致土壤水分改变,这主要与地表覆被、农业耕作有关。地表覆被增加减少土壤水分蒸发,耕作改变土壤通气性和土层结构;③土地利用变化引发的土壤侵蚀变化十分明显,天然草场、人工草场及适当的种植与荒漠相比,在一定程度上防止或减弱了土壤侵蚀强度。因次生盐渍化重新废弃的土地又

将加剧土壤侵蚀,必须合理使用水资源,加大水利设施的投入,防止土地次生盐渍化;④土地利用变化对土地生产力影响明显。原始胡杨林和人工草场的植被覆盖率、土壤根系含量均较高,远远大于荒漠的土地生产力,因不当利用造成的废弃地土地生产力与荒漠则十分接近。因此,在生态环境相当脆弱的干旱区适度发展牧业仍然是可行的,已经取得防治荒漠化经验也证实上述观点。与此同时,应当利用国内粮食生产相对过剩的有利时机,积极调整土地利用结构,退耕还草,退耕还林,严禁盲目开垦荒地。加大农田水利设施、农田保护林、防风固沙林等基础设施建设,对防止土地退化(荒漠化)是十分有益的。

4 结 论

(1)土地利用变化对土壤性状的影响及响应十分明显。库尔勒市荒漠开垦后土壤质量总体呈下降趋势,土壤侵蚀总量也呈下降趋势,但土地生产力则有比较明显的上升。

(2)土壤侵蚀强度与土地生产力的替代指标植被覆盖率和根系含量呈明显的负相关关系,反映土壤侵蚀对土地生产力的负面效应。土地生产力又与土壤水分含量呈明显的正相关关系,反映了植被覆盖对水分保持的作用,说明保持地表植被对防止西北地区干旱化是至关重要的。

(3)本区适当地发展牧业是可行的,最佳的土地利用方式是林、草。只要积极调整土地结构,退耕还草,退耕还林,严禁盲目开垦荒地,并加以一定的预防和治理措施,在一定程度上可以防止或减弱土地退化(荒漠化)进程。

参考文献

- [1] Fu Bojie, Ma Keming, Zhou Huafeng, et al. The effect of land use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(8): 732~736.
- [2] Vitousek P M. Beyond global warming; Ecology and Global Change. *Ecology*, 1994, **75**(7): 1 861~1 876.
- [3] Skukla J. Amazonian deforestation and climate change. *Science*, 1990, **247**: 1 322~1 324.
- [4] Maston P A, Vitousek P M. Ecosystem approach to a global nitrous oxide budget. *Bioscience*, 1990, **40**: 667~672.
- [5] Fung I Y, John J, Lerner J, et al. Three-dimensional model synthesis of the global methane cycle. *Journal of Geo Research*, 1991, **96**(D7): 13 033~13 065.
- [6] Mooney H A. Exchange of materials between terrestrial ecosystem and the atmosphere. *Science*, 1987, **238**: 26~32.
- [7] Richey J E, Nobre C, Deser C. Amazon River discharge and climate variability, 1903~1985. *Science*, 1989, **246**: 101~103.
- [8] Carpenter S R, Fisher S G, Grimm N B. Global change and freshwater ecosystem. *Annual Review of Ecological System*, 1992, **23**: 119~140.
- [9] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响. *地理学报*, 1999, **54**(3): 241~246
- [10] 樊自立. 新疆土地开发对生态环境的影响及对策研究. 北京: 气象出版社, 1996. 130~140.
- [11] 陈 浮, 刘 伟, 王铁卫, 等. 农用土地价格评估——以库尔勒市为例. *自然资源学报*, 1998, **13**(2): 162~168.
- [12] 濮励杰, 包浩生, 彭补拙, 等. ^{137}Cs 应用于我国西部风蚀地区土地退化的初步研究. *土壤学报*, 1998, **35**(4): 441~449.
- [13] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测. *土壤学报*, 1998, **35**(1): 135~140.
- [14] Chen Fu, Pu Lijie. Responses of soil to land use changes in arid region. *南京大学学报(自然资源学报)*, 2000, **36**(3): 371~374.
- [15] Zhang Xinbao, 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. *Hydrological Sciences Journal*, 1990, **35**(2): 267~276.
- [16] Sutherland D E, Kowalchek T, Dejong E. Caesium-137 estimates of sediment redistribution by wind. *Soil Science*, 1991, **151**(15): 387~396.
- [17] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1990, **2**: 161~175.
- [18] 杨 浩, 杜明远, 赵其国, 等. 基于 ^{137}Cs 地表富集作用的土壤侵蚀速率的定量模型. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, **5**(3): 42~48.
- [19] 张信宝, Higgitt D L, Walling E. ^{137}Cs 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究. *地球化学*, 1991, (3): 212~218.
- [20] Prissel M J, Pennders R. Model for the accumulation of ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Cs}$ and ^{241}Am in the upper layer of soils. In: G. G. Heathrey, J N Bell, T M Roberts, ed. *Ecological aspects of radionuclide*. Oxford: Blackwell, 1983. 63~72.