

土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值含量动态平衡模型

陈瑞廷, 张明礼, 杨浩

(南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023)

摘 要:在利用土壤侵蚀模型估算侵蚀速率的过程中,背景值点选取的好坏直接关系到结论是否可靠,如果能通过科学计算得出研究区域背景值,将大大提高背景值的准确性,对研究土壤侵蚀具有重大意义。土壤未受到侵蚀和沉积的背景区,首先假设全球大气沉降量为定值,研究把 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉降过程以一年为时间尺度划分为 n 年,经过 n 年以后($n=0,1,2,\dots,\infty$),土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉降量和经过衰变减少量达到平衡,土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量趋于稳定。假设各地年平均降水量为定值,通过研究发现 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的大气沉降通量与年降水量之间存在极显著相关($P<0.01$),区域年降水量是影响土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 量的主要因素,由于年平均降水量不同,全球各地土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量都会达到不同的稳定值,从而建立土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量与年降水量关系模型。研究 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 来源、沉降的连续性和稳定性,提出利用区域年平均降水量来计算该地区的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值,建立土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值含量动态平衡模型,为准确确定 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值提供了方法,对研究土壤侵蚀具有重要的意义。

关键词: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值; 大气沉降量; 年降水量

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0073-04

Dynamic Equilibrium Model of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ Background Value in Soil

CHEN Rui-ting, ZHANG Ming-li, YANG Hao

(College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Selection of background value point is directly related to the conclusion that is reliable or not in the process of estimating erosion rate by use of soil erosion model. If the background value can be calculated through scientific research, which will greatly improve the accuracy of the background value and is great significance of soil erosion study. In the background region, the soil is not affected by erosion and deposition, assuming that the atmospheric precipitation amount setting value. Based on the time scale of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ sedimentation process for one year time scale, after n years later, the soil $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ settlement and the amount of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ decay decrement achieve balance in this study. It is assumed that an average annual rainfall is constant in various regions. Research finds that correlation between $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ atmospheric subsidence flux and annual rainfall is extremely significant correlation ($p<0.01$). Regional annual precipitation becomes main factors affecting the amount of soil $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Because the annual rainfall is different around the world, the $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ content can reach the stability of the different values, so as to establish relationship model with annual precipitation $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ content in the soil. According to the $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ settlement continuity and stability, this research put forward to calculate the area of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ background value through the regional average annual precipitation. According to the establishment of the soil $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ background value content dynamic equilibrium model, it provides a method of accurately determining $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ background value and has an important significance to regional soil erosion research.

Key words: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ background value; atmospheric settlement; annual precipitation

在过去的数十年中,利用由 20 世纪 60 年代核试验产生的 ^{137}Cs 元素(Cs-137,半衰期为 30.2 a)示踪

法研究土壤侵蚀在世界范围内被广泛使用^[1-3],然而,研究者发现,在利用 ^{137}Cs 示踪时,越来越多的因素限

收稿日期:2012-10-21

修回日期:2013-03-01

资助项目:国家自然科学基金项目(41173094,41030751);江苏高校优势学科建设工程资助项目;江苏省教育厅重大项目(09KJA170002)

作者简介:陈瑞廷(1988—),男,山东省济宁市人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:easy03026@126.com

通信作者:张明礼(1976—),男,山东省临沂市人,博士,主要研究方向为土壤侵蚀与环境效益。E-mail:geozhml@163.com

制其应用^[4]。从而对于利用核示踪技术来研究土壤侵蚀有一定的影响,而天然产生的²¹⁰Pb_{ex}凭借其沉降的连续性和稳定性,已经成为研究土壤侵蚀的重要核素,其土壤吸附性以及随水土流失再分布模式与¹³⁷Cs相似,其优点还在于,¹³⁷Cs示踪法所研究的时间跨度为45 a左右,而²¹⁰Pb_{ex}能研究过去大约一百年内的土壤侵蚀速率^[4-5]。²¹⁰Pb是²³⁸U系衰变的一种天然放射性核素,半衰期22.26 a。²²⁶Ra做为²³⁸U的系列衰变产物之一,广泛存在于土壤和岩石中,它衰变产生气体²²²Rn,一部分²²²Rn存留于土壤中直接衰变为²¹⁰Pb;另一部分²²²Rn进入大气衰变为²¹⁰Pb,大气中的²¹⁰Pb通过干湿沉降到地面,随即被土壤颗粒吸附,故土壤²¹⁰Pb有两部分来源。为区别于土壤中生成的²¹⁰Pb,大气沉降部分标记为²¹⁰Pb_{ex},²¹⁰Pb_{ex}的比活度为²¹⁰Pb的比活度与²²⁶Ra比活度的差值。国内外学者研究土壤侵蚀时背景值的确定都是通过实地采样,选取背景值点的条件是无侵蚀和沉积地点,但在某一限定的区域(研究区),有时难以找到这样理想地。本文利用数学模型进行定量计算,为背景值的确定提供新方法。假设²¹⁰Pb_{ex}大气沉降量为定值,当土壤未被侵蚀和沉积时,土壤中²¹⁰Pb_{ex}含量只受年平均降水量影响,且如果假设某一地区年降水量为定值时,经过 n 年以后($n=0,1,2,\dots,\infty$),²¹⁰Pb_{ex}含量为定值,这对研究背景值有重要意义。

1 动态平衡模型原理

假设研究区域既无沉积,也无侵蚀现象发生,由于²¹⁰Pb_{ex}沉积是连续且稳定的,所以本研究把²¹⁰Pb_{ex}沉降过程以一年为时间尺度划分为 n 年,假定第1年的沉降量为1,根据元素衰变公式 $N=N_0 \times (\frac{1}{2})^{\frac{t}{T}}$ ($t=0,1,2,3,\dots$),其土壤中²¹⁰Pb_{ex}剩余量为 $\frac{1}{2^{\frac{n}{22.3}}}$,即为1。当经过22.3 a后,大气沉降在土壤中所剩余量为 $\frac{1}{2^{\frac{22.3}{22.3}}}$,即为 $\frac{1}{2}$,依次类推,第 n 年时,所剩余量为 $\frac{1}{2^{\frac{n}{22.3}}}$ 。 N_0 为大气沉降量, N 为经过 t 年后的元素剩余量, δ 为元素半衰期。所以,可以得出某一年的沉降量经过 n 年以后的剩余量为 $\frac{1}{2^{\frac{n}{22.3}}}$,而在计算研究区域中²¹⁰Pb_{ex}含量时,由最后一次的沉降量(假设为1)加上上一次的沉降剩余量,依次类推得出研究区域的²¹⁰Pb_{ex}含量为:

$$1 + \frac{1}{2^{\frac{1}{22.3}}} + \frac{1}{2^{\frac{2}{22.3}}} + \frac{1}{2^{\frac{3}{22.3}}} + \dots + \frac{1}{2} + \frac{1}{2^{\frac{23}{22.3}}} + \dots + \frac{1}{2^{\frac{n-1}{22.3}}}$$

根据等比数列计算公式得出 $y = [1 - (2^{\frac{-1}{22.3}})^n] / (1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})$,其中 y 为²¹⁰Pb_{ex}含量, n 为时间(年)。

$$y = [1 - (2^{\frac{-1}{22.3}})^n] / (1 - 2^{\frac{-1}{22.3}}) \quad n=1,2,3,4,\dots \quad (1)$$

$$y' = \frac{1}{(1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})} - \frac{(2^{\frac{-1}{22.3}})^n}{(1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})}$$

$$y' = - \frac{(2^{\frac{-1}{22.3}})^n \times \ln(2^{\frac{-1}{22.3}})}{(1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})}$$

$$y' = - \frac{(\frac{-1}{22.3}) \times (2^{\frac{-1}{22.3}})^n \times \ln 2}{(1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})}$$

$$y' = \frac{\frac{1}{22.3} \times (2^{\frac{-1}{22.3}})^n \times \ln 2}{(1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})} > 0$$

$$y'' = \frac{\frac{1}{22.3} \times \ln 2}{(1 - 2^{\frac{-1}{22.3}})} \times (2^{\frac{-1}{22.3}})^n \times \frac{-1}{22.3} \times \ln 2 < 0$$

由于 $y' > 0$,从而得出(1)式为单调递增函数; $y'' < 0$,由于(1)式的二阶导数小于0,所以其变化趋势会越来越趋于平缓,但不会等于零。 y 值会无限接近29.356 8,但不会相等。

y 值是趋于定值的,这就说明²¹⁰Pb_{ex}经过若干年沉降后,在土壤中达到平衡。由于土壤中²¹⁰Pb_{ex}含量来源于大气湿沉降和干沉降,各地干沉降都是经过大气环流运动后沉降到各地土壤中,假设各地²¹⁰Pb_{ex}经过干沉降到达地面的量相同, y 值的变化主要取决于湿沉降,就是年平均降水量。不同地区²¹⁰Pb_{ex}大气沉降量与年降水量的分布见表1。

2 大气沉降量与年降水量关系研究

²¹⁰Pb_{ex}大气沉降量主要与降水相关,由于全球大部分地区干湿季节明显,不同月份的大气沉降量不同,但长期内某一地区的年均沉降量是一致的^[6-7]。所以本文研究²¹⁰Pb_{ex}大气沉降量与年平均降水量的相关性,找出两者之间的线性关系,利用年平均降水量这一指标来代替大气沉降量。

²¹⁰Pb_{ex}的大气沉降通量Bq/(m²·a)与年降水量呈非线性相关,其表达式为 $y = 16.598 \times e^{0.0019x}$, $R^2 = 0.803 8$,如图1所示。由图1可以看出,²¹⁰Pb_{ex}的大气沉降通量与年降水量之间存在的良好的非线性关系,经过 T 检验,²¹⁰Pb_{ex}的大气沉降通量与年降水量之间存在极显著相关, $P < 0.01$,Pearson乘积矩相关系数 r 为0.854 6,说明大气湿沉降是²¹⁰Pb_{ex}沉降的主要影响因素之一。

表 1 不同地区²¹⁰Pb_{ex}大气沉降量与年均降水量

采样点	²¹⁰ Pb _{ex} 大气沉降量/(Bq·m ⁻² ·a ⁻¹)	年平均降水量/mm	研究者
Milford Haven 51.44 5.02w	84.99	901.8	Peirson,Cambray&Spicer ^[9]
Hokkaido Japan station 1	287.14	1270.5	Fukuda&Tsunogai ^[10]
Hokkaido Japan station 2	440.26	1500	Fukuda&Tsunogai ^[10]
Hokkaido Japan station 3	462.69	1697	Fukuda&Tsunogai ^[10]
Stillpond, Maryland	130	1260	Guebuem Kim ^[11]
Norfolk, Virginia1	141.67	1290	Todd 等 ^[12]
College Station, Texas	130	980	Baskaran 等 ^[13]
College Station, Texas	225	1460	Baskaran 等 ^[13]
Galveston, Texas	111.67	970	Baskaran 等 ^[13]
Galveston, Texas	285	1500	Baskaran 等 ^[13]
东海附近三门县	341.6291	1645	钱江初等 ^[14]

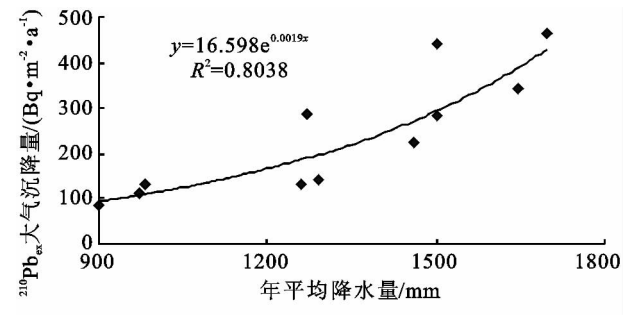


图 1 ²¹⁰Pb_{ex}大气沉降通量与年平均降水量相关性分析

3 修正系数

由于区域内²¹⁰Pb_{ex}沉降经过若干年后趋于定值，

且沉降量的主要影响因素年平均降水量与大气沉降通量的关系式为 $y = 16.598 \times e^{0.0019x}$ ，所以可以得出某区域的年平均降水量与²¹⁰Pb_{ex}背景值得关系式：

$$Y = [1 - (2^{\frac{-1}{22.3}})^n] \times (16.598 \times e^{0.0019x}) \times \delta / [1 - (2^{\frac{-1}{22.3}})]$$

其中 n 为时间,单位为年, x 为年平均降水量,单位为 mm。²¹⁰Pb_{ex}主要通过干湿沉降到达地面,由于大气环流作用,²¹⁰Pb_{ex}干沉降量各地相差不大,所以把干沉降的²¹⁰Pb_{ex}沉降量假设为修正系数 δ 。根据国内研究者对我国不同地区²¹⁰Pb_{ex}背景值的研究,经过计算确定 δ 平均值为 4.9。

表 2 各地区年降水量与²¹⁰Pb_{ex}背景值以及修正系数分析

研究地区	年平均降水量/mm	²¹⁰ Pb _{ex} 背景值/(Bq·m ⁻²)	修正系数	研究者
Mojiagou Basin	642	8954	5.42	YANG Yu-Hong ^[15]
黑龙江克山区	499	6600	5.24	王禹 ^[16]
青藏高原三江源地区	86~786	2612~7377	3.39~4.55	李俊杰等 ^[17]
四川内江	1064	18902.2	5.13	Zheng 等 ^[18]
四川简阳地区	850(统计资料)	12589.9	5.24	Zhang 等 ^[19]
黄土高原	517	5730	4.40	Zhang 等 ^[20]

4 结论

由于²¹⁰Pb_{ex}是天然核素,具有稳定且连续的沉降特性,越来越多地被应用于核示踪技术研究土壤侵蚀。本研究运用其特性研究得出,经过若干年的沉降及衰减,其含量会达到平衡,对其含量影响的因素有湿沉降和干沉降,湿沉降由年降水量表示,干沉降定义为常数 δ ,其含量表达式为 $[1 - (2^{\frac{-1}{22.3}})^n] \times (16.598 \times e^{0.0019x}) \times 4.9 / [1 - (2^{\frac{-1}{22.3}})]$ 。

准确的背景值是利用土壤侵蚀模型估算土壤侵蚀模数的关键,本研究利用建立数学模型来计算研究区域²¹⁰Pb_{ex}背景值,为通过计算得到背景值提供可行性方法,在下一步的研究中可以结合实际采样得到的背景值对本模型进行完善,对研究土壤侵蚀有重要意义。

参考文献:

[1] Kato H Y, Onda Y T. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} measurements to estimate soil redistribution rates on semi-arid grassland in Mongolia[J]. Geomorphology,2010,14(1): 508-519.

[2] YANG Yu-Hong, YAN Bai-Xing, ZHU Hui. Estimating soil erosion in Northeast China using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex}[J]. Pedosphere,2011,21(6):706-711.

[3] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using ¹³⁷Cs tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China[J]. Pedosphere,2006,16(2):201-209.

[4] Walling D E, He Q. Using Fallout Lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999,63(5):1404-1412.

- [5] Porto P, Walling D E, Callegari G, et al. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion in three small catchments in Southern Italy[J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2006, 6(5/6): 657-667.
- [6] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply unsupported ^{210}Pb to sediment[J]. Catena, 1978, 5(1): 1-8.
- [7] Nozaki Y, DeMaster D J, Lewis D M, et al. Atmospheric ^{210}Pb fluxes determined from soil profiles[J]. Geophys. Res., 1978, 83(8): 4047-4051.
- [8] Turekian K Y, Nozaki Y, Benninger L K. Geochemistry of atmospheric radon and radon products[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 1977, 5: 227-255.
- [9] Peirson D H, Cambray R S, Spicer G S. Lead-210 and polonium-210 in the atmosphere[J]. Tellus, 1966, 18: 427-433.
- [10] Fukuda K, Tsunogai S. Pb-210 in precipitation in Japan and its implication for the transport of continental aerosols across the ocean[J]. Tellus, 1975, 27(5): 514-521.
- [11] Guebuem K, Hussain N, Scudlark J R, et al. Factors influencing the atmospheric depositional fluxes of stable Pb, ^{210}Pb and ^7Be into Chesapeake Bay[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2000, 36(1): 65-79.
- [12] Todd J F, Wong G T F, Olsen C R, et al. Atmospheric depositional characteristics of Beryllium-7 and Lead-210 along the southeastern Virginia Coast[J]. J. Geophys. Res., 1989, 94(D8): 11106-11116.
- [13] Baskaran M, Coleman C H, Santschi P H. Atmospheric depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb at Galveston and College Station, Texas[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98(D11): 20555-20571.
- [14] 钱江初, 王星福, 徐征宇. 东海附近大气中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沉降通量[J]. 东海海洋, 1986, 4(1): 27-33.
- [15] Yang Yu-Hong, Yan Bai-Xing, Zhu Hui. Estimating soil erosion in Northeast China using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ [J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 706-711.
- [16] 王禹. ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 复合示踪研究东北黑土区坡耕地土壤侵蚀速率[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [17] 李俊杰, 李勇, 王仰麟, 等. 三江源区东西样带土壤侵蚀的 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(12): 1452-1459.
- [18] Zheng Jin-Jun, He Xiu-Bin, Walling D E, et al. Assessing soil erosion rates on manually-tilled hillslopes in the Sichuan Hilly Basin using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements[J]. Pedosphere, 2007, 17(3): 273-283.
- [19] Zhang X, Qi Y, Walling D E, et al. A preliminary assessment of the potential for using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurement to estimate soil redistribution rates on cultivated slopes in the Sichuan Hilly Basin of China[J]. Catena, 2006, 68(1): 1-9.
- [20] Zhang X B, Walling D E, Feng M Y, et al. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements[J]. China Sci. Bull., 2003, 48(8): 813-818.

(上接第72页)

- [7] 邹琦. 作物抗旱生理生态研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1994.
- [8] 李吉跃. 太行山主要树种耐旱特性的研究(Ⅳ): 蒸腾作用与气孔调节[J]. 北京林业大学学报 1991, 13(增刊 2): 240-250.
- [9] 汤章城. 名词解释[J]. 植物生理学通讯, 1984(3): 71.
- [10] 王焘. 逆境胁迫过程中作物光合作用下降的气孔与非气孔行为的理论分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [11] 苏建平. 我国树木蒸腾耗水研究进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 177-179.
- [12] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70-76.
- [13] 徐世昌. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J]. 作物学报, 1995, 2(3): 353-363.
- [14] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] Sharkey T D. Photosynthesis in intact leaves of C_3 plant: Physiology and rate limitations[J]. Bot. Rev., 1985, 51(1): 51-105.
- [16] Tayler G E, Gunderson J. Physiological site of ethylene effects on carbon dioxide assimilation in *Glycine max* L Merr[J]. Plant Physiol., 1988, 86(1): 85-92.
- [17] 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 等. 水分胁迫下天然次生灌木山桃和山杏光合气体交换特征[J]. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2492-2499.
- [18] Torrecillas A, Galego R, Perez-Paster A, et al. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions[J]. The Journal of Agricultural Science, 1999, 132(4): 445-452.
- [19] 冯燕, 王彦荣, 胡小文. 水分胁迫对两种荒漠灌木幼苗生长与水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 293-298.
- [20] 莎仁图雅, 田有亮, 郭连生. 大青山区油松人工林土壤水分特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(3): 162-165.