试验研究

黄土丘陵区坡地侵蚀对土壤呼吸的影响

裴会敏[1]，许明祥[1,2]，脱登峰[1]

(1. 西北农林科技大学 林学院，陕西 杨凌 712100；2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100)

摘　要：以黄土丘陵区两种肥力水平的坡地土壤为研究对象，采用人工模拟侵蚀(表土剥离 0，5，10 cm)和动态密闭气室法(Li-8100，USA)，探讨了坡地不同侵蚀强度下土壤呼吸的变化特征及水热因子对土壤呼吸的影响。结果表明：(1) 一定温度和湿度条件下，强度侵蚀显著降低土壤呼吸速率($P<0.05$)，其影响程度与土壤肥力有关，高肥土壤侵蚀 5 cm 后呼吸速率较未侵蚀土壤降低了 32%，而低肥土壤呼吸速率降低了 14%；(2) 两种肥力土壤呼吸的侵蚀效应在干湿交替前后表现出不同的变化规律，降雨使土壤呼吸速率激增，且放大了表土流失的侵蚀效应；(3) 观测期内土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著正相关，而与土壤温度无明显相关性，说明短期内影响侵蚀土壤呼吸速率日际变化的主要因子为土壤湿度；(4) 在计算坡面 CO_2 排放时若忽视侵蚀的影响，将可能高估侵蚀引起的原位碳排放效应。严重表土流失可能通过影响土壤呼吸而改变陆地生态系统碳平衡。

关键词：土壤呼吸；表土流失；黄土丘陵区

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2012)04-0001-04　　**中图分类号**：S157，S154.1

Effects of Erosion on Soil Respiration on Slopeland in Loess Hilly Region

PEI Hui-min[1], XU Ming-xiang[1,2], TUO Deng-feng[1]

(1. *Forestry College, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To understand the effects of erosion on soil respiration(R_s), we analyzed temporal variations of R_s on the slope lands and its relationship with soil temperature and moisture under artificial stimulated erosion conditions(top soils removed at the depths of 0, 5, 10 cm, referred to as E_0, E_5 and E_{10}) with a dynamic closed chamber. Two type of lands in which the fertility levels differed distinctly were chosen to deploy the experiments. The results indicate that with similar temperature and rainfall, the rates of R_s were affected significantly by erosion and the affecting degree was related closely to the fertility level of the land. Comparing to the control(original soil without removal of top soil), the R_s rates of the soils with the erosion level of E_5 decreased by 32% and 14% in the fertile and poor soils, respectively. The rainfall stimulated the R_s rates and amplified the effects of erosion on the R_s rates. Soil moisture contents were closely correlated with the R_s rates, and conversely, the soil temperature was not. Soil moisture was the main controlling factor responsible for the variations of soil respiration rates during water erosion events. The results suggested that the effects of erosion on R_s rates should be considered in understanding and estimating carbon loss in the loess hilly region. Soil erosion may alter the carbon balance through dynamic changes of R_s in these ecosystems, which could have important negative consequences for ecosystem functions and sustainability.

Keywords: soil respiration; surface soil loss; loess hilly region

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环中的关键过程，它每年向大气释放的 CO_2 高达 68～80 Pg，是全球化石燃料燃烧 CO_2 释放量的 10 倍以上[1,2]，微小的变化也会对大气 CO_2 浓度和全球碳过程产生巨大影

收稿日期：2012-02-20　　修回日期：2012-04-03
资助项目：国家自然科学基金项目“黄土高原深层土壤有机碳固存及对土地利用/覆被变化的响应”(41171228)；中科院战略性先导科技专项子课题“西北农田土壤固碳潜力与速率研究”(XDA05050504)；中科院知识创新重要方向项目“黄土高原退耕还林还草对陆地生态系统 C 循环的影响”(KZCX2-YW-443)
作者简介：裴会敏(1984—)，男(汉族)，山西省运城市人，硕士研究生，主要研究方向为土壤侵蚀的环境效应。E-mail：huiminpei@163.com。
通信作者：许明祥(1972—)，男(汉族)，陕西省吴旗县人，副研究员，主要研究方向为侵蚀环境土壤质量演变及土壤—植被互动效应研究。E-mail：xumx@nwsuaf.edu.cn。

响。因此,准确估算不同生态系统土壤呼吸并深入探讨控制机理对科学评价土壤碳收支与预测未来大气 CO_2 浓度都具有重要意义。

土壤侵蚀主要通过搬运泥沙和改变土壤呼吸来影响土壤碳循环。近来有科学家提出全球被侵蚀的耕种土壤每年可引起一个 0.12 Pg 的碳汇观点再次引发人们对侵蚀的环境效应争议[3,4]。黄土高原是土壤侵蚀最为严重的地区之一,而坡地土壤侵蚀是其水土流失和生态环境恶化的主要原因[5],许多学者关注该区坡地水土流失的机理和影响机制[6,7],而对侵蚀坡地土壤呼吸的野外实验研究鲜有报道,且仅见于模型模拟研究[8]。复杂的水蚀过程中,土壤呼吸是降雨和表土流失耦合作用的结果,关于降雨量和降雨强度对土壤呼吸的影响研究已经比较深入[9-12],而关于表土流失对其影响的机理研究较少。通过野外斑块尺度的模拟试验和对土壤呼吸的多频观测是了解和量化表土流失与土壤呼吸关系的补充和完善,将进一步降低土壤呼吸估算中的不确定性,且有助于完整揭示土壤呼吸影响机制与构建碳循环模型。

本文以水蚀严重的坡地土壤为研究对象,通过对各侵蚀强度下土壤呼吸速率、温度和湿度的动态监测,以期阐明表土流失对农田生态系统土壤呼吸的影响,揭示各呼吸通量主要调控因子,为深入认识农田生态系统土壤碳收支研究提供科学依据。

1 研究区概况

本研究试验于 2011 年 5—8 月在中国科学院安塞水土保持综合试验站(108°51′44″—109°26′18″E,36°30′45″—37°19′31″N)进行。研究区地处黄土高原中部,属典型的梁峁状丘陵沟壑区。年均气温 8.8 ℃,年均降水量 500 mm,其中 7—9 月份的降水量占全年降水的 61.1%,年蒸发量大于 1 463 mm,年日照时数 2 300～2 400 h,日照百分率达 54%,为典型的雨养农业区。该区陡坡地占耕地总面积的 70%以上,土壤侵蚀以细沟、浅沟侵蚀为主,平均侵蚀模数达 2 180 t/(km^2 · a)[13]。地带性土壤(黑垆土)已侵蚀殆尽,土壤以黄土母质上发育来的黄绵土(钙质干润雏形土)为主。

2 研究方法

本试验布置是 2011 年 5 月选择两个 4 m×4 m 的田间小区,坡度为 18°,参考当地有机肥施用量(12 500 kg/hm^2),高肥样地为施加 20 kg 羊粪于表层土壤并翻耕,低肥样地仅对表层 20 cm 均匀翻耕,定期除草,使表土裸露。试验处理于 2011 年 7 月 13 日开始,把每个小区分成 9 个 1 m×1 m 微小区,随机抽取 3 个作为一组处理,分别剥离深度为 0,5,10 cm 的表土[14,15],其侵蚀强度分别记作 E_0, E_5, E_{10}。在试验观测历时 18 d(8 月 1 日)时遇自然降雨,雨量为 48 mm。

2.1 土壤呼吸及温湿度测定

土壤呼吸速率(R_s)测定采用 Li-COR 公司的 LI-8100 开路式土壤碳通量自动测量系统。在表土被挖开后,将 18 个直径为 20 cm 的专用 PVC 管插入每个微小区中间,露出表土 3 cm 左右。所有土壤呼吸测量在每天早上 9—11 时进行。监测期间 PVC 管均不移动,环内除有少量的降尘外,没有植物生长。在测定土壤呼吸的同时,用时域反射仪(TDR-300)测定土壤 0—6 cm 土层的体积含水量(W);5 cm 土壤温度 T 用数显地温计测定。

2.2 土壤有机质及容重测定

试验结束后,用环刀法测表层土壤容重。在每个样地内随机用内径为 5 cm 土钻采表层 20 cm 土样,土样为 3 次重复的混合样,共得到 18 个混合土样。土样采回后,充分风干并过 0.25 mm 土筛,用重铬酸钾—外加热容量法测定有机质含量[16](表 1)。

表 1 不同侵蚀强度下坡地土壤有机质和容重

土壤肥力	侵蚀强度	有机质/(g · kg^{-1})	容 重/(g · cm^{-3})
高肥土壤(HF)	E_0	12.29±0.33	1.16±0.04
	E_5	9.12±0.37	1.18±0.10
	E_{10}	7.65±0.43	1.19±0.07
低肥土壤(LF)	E_0	5.79±0.29	1.18±0.14
	E_5	4.86±0.21	1.19±0.06
	E_{10}	4.59±0.23	1.20±0.09

注:E_0,E_5,E_{10} 分别代表剥离深度为 0,5,10 cm 的 3 种处理的侵蚀强度。下同。

2.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 17.0,进行数据处理和统计分析,用单因素方差分析的方法对不同侵蚀强度之间土壤呼吸数据进行均值差异显著性分析,显著性水平设为 $P=0.05$;并用 Pearson 相关系数分析土壤呼吸速率与土壤温度、体积含水量之间的相关关系。

3 结果分析

3.1 不同强度侵蚀对土壤呼吸的影响

从图 1 可知,表土流失显著降低了原位土壤的呼吸速率。观测期内,高肥土壤平均呼吸速率从 E_0 的 4.62 μmol/(m^2 · s)降为 E_5 的 3.14 μmol/(m^2 · s)和 E_{10} 的 2.41 μmol/(m^2 · s)。而低肥土壤平均呼吸

速率从 E_0 的 1.75 μmol/(m² · s)降为 E_5 的 1.51 μmol/(m² · s)和 E_{10} 的 1.37 μmol/(m² · s)。试验条件下,不同侵蚀强度(E_5 和 E_{10})对原位土壤呼吸的影响无显著差异。在观测期内,高肥土壤侵蚀 5 cm 后,有机质降低 26%,土壤呼吸速率降幅达 32%;而低肥土壤有机质降低 21%,土壤呼吸速率降幅为 14%(表 1)。高肥和低肥样地侵蚀 5 cm 后,通过土壤呼吸损失的碳量分别约占表土流失碳量的 0.63% 和 0.64%。表土流失量的加倍对土壤呼吸无显著影响,说明 CO_2 通量可能仅仅与流失表土量达到微生物呼吸所需要的有效底物供应阈值有关,达不到阈值对呼吸便无影响。

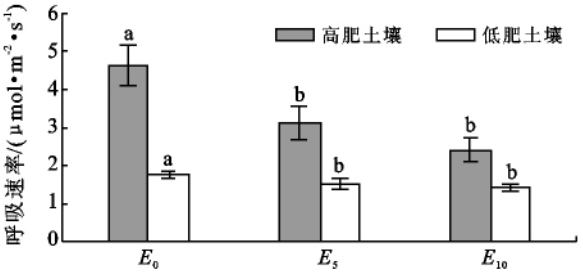


图 1　不同侵蚀强度下土壤呼吸速率

经历相似的温度和降雨后,坡地表土流失明显降低土壤呼吸速率,这不同于 Bajracharya 等在多年侵蚀坡位上发现其土壤呼吸之间长期无明显差异的结论[16]。这说明坡耕地侵蚀不仅对土壤质量的影响存在时间差异性[17],也同样适用于对土壤呼吸的影响。土壤 CO_2 通量的短期侵蚀效应受呼吸底物的影响差异较明显,而长期格局可能是由资源水平和环境条件共同决定。另外除农田土壤养分如碳氮含量降低外,侵蚀还导致土壤容重略微增加和空隙度减小,这些变化均在一定程度上限制了土壤呼吸强度。本研究也一定程度上证实:侵蚀对土壤有机碳矿化的影响主要决定于侵蚀程度和侵蚀发生地的土壤条件,这与 Jacinthe 等的研究结果一致[18]。

3.2 土壤呼吸对侵蚀的响应动态

干湿交替条件下,土壤水分对土壤呼吸的影响主要是通过调节微生物的生理活动、能量供应和土壤的通气状况等实现。通过剥离表土后历时 35 d 的观测,发现高肥与低肥土壤在不同侵蚀强度下土壤呼吸速率的变化趋势与土壤湿度变化基本一致(图 2—3)。而各样地土壤呼吸的侵蚀效应在干湿交替前后表现出不同变化规律,高肥土壤 E_0 与 E_5 之间在各个时间点均呈现显著性差异,而 E_5 与 E_{10} 之间在大部分时段内无明显差异;低肥土壤呼吸速率在试验前期(0—5 d)差异不显著,在 10—35 d 之间差异则达显著水平。在历时 20 d 时,高肥和低肥土壤 E_5 的侵蚀效应较干旱期(历时 15 d 时)分别提高了 3.9 倍和 2.6 倍。降雨明显提高了土壤呼吸速率,同时放大了土壤呼吸的侵蚀效应。坡地土壤有机质含量低时,土壤呼吸对温湿度变化的响应较弱,且呼吸速率的时间差异大于空间差异,说明环境因素如温湿度对呼吸的影响大于土壤本身的作用,但具体机理还有待进一步研究。

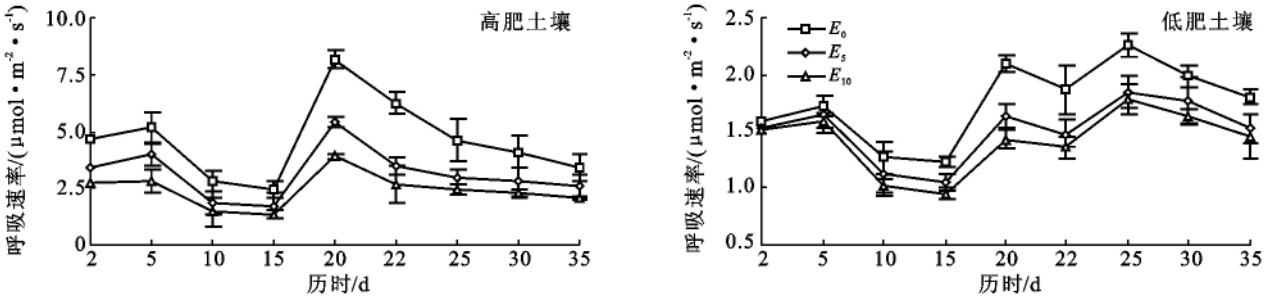


图 2　不同侵蚀强度下土壤土壤呼吸的日际动态

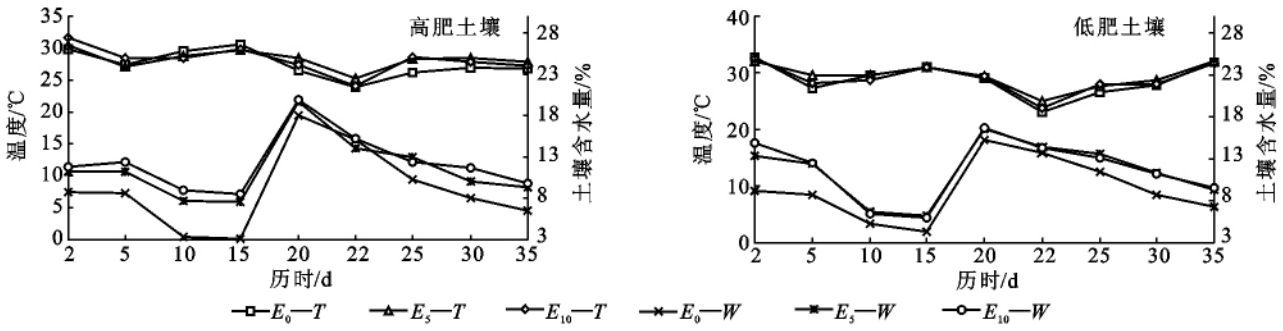


图 3　不同侵蚀强度下坡地土壤温度(T)和体积含水量(W)的动态

3.3 侵蚀坡地土壤呼吸速率与温湿度的关系

土壤温湿度是干旱半干旱地区调控土壤呼吸的主要因子，但它们的相对重要性却存在争议[19]。结合表 2 与图 3 可知，观测期内两种肥力土壤不同侵蚀处理下土壤呼吸速率均与地下 6 cm 土壤湿度之间呈显著正相关，且高肥土壤各处理的相关系数均大于低肥土壤，随着侵蚀程度的加剧，相关系数呈减小趋势，这可能与各样地土壤有机质差异较大有关。由于土壤含水量的限制，地下 5 cm 土温的作用并不显著。说明在干旱半干旱地区水蚀过程中土壤湿度可以影响土壤呼吸和它的温度敏感性，取代 5 cm 土壤温度成为限制土壤呼吸速率日际变化的主要因子，这与以往的研究结论一致[20]。自然界中长期土壤侵蚀在很大程度上已改变了土壤水文循环，所以在未来的降雨和温度情形下，我们预测坡地侵蚀土壤的低持水性和对温度的不敏感性将有利于减缓土壤向大气排放 CO_2。

表 2 不同侵蚀强度下坡地土壤呼吸速率与环境因子的相关性

样 地	E_0—T	E_5—T	E_{10}—T	E_0—W	E_5—W	E_{10}—W
C—HF	−0.66	−0.28	−0.14	0.957**	0.913**	0.901**
C—LF	−0.66	−0.38	−0.16	0.807**	0.727*	0.668*

注：* 和 * * 分别表示显著（$p<0.05$）及极显著（$p<0.01$）相关；C—HF，C—LF 分别为高肥和低肥处理土壤呼吸与温度（T）和体积含水量（W）的相关系数。

4 结 论

在侵蚀坡地上土壤呼吸主要是微生物参与下有机质分解的生物化学过程，而土壤中可供微生物呼吸消耗的有效底物量制约着 CO_2 的释放，所以土壤呼吸一方面可以表征土壤流向大气的 C 通量，另外也反映出土壤本身的肥力水平。本文通过在野外历时 35 d 的短期观测，得到如下主要结论。

（1）一定的温湿度条件下，强度侵蚀明显降低土壤呼吸速率（$P<0.05$），而其影响程度与土壤肥力条件有关。侵蚀 5 cm 时高肥土壤呼吸速率较未侵蚀土壤降低 32%，而低肥土壤呼吸速率降低 14%。

（2）两种肥力下侵蚀对土壤呼吸的效应在干湿交替前后表现出不同变化规律，降雨对土壤呼吸速率具有激增效应，且在不同程度上放大了侵蚀效应。在估算坡地表土流失对 CO_2 排放影响时应当考虑降雨的影响。

（3）观测期内土壤呼吸速率与土壤湿度呈显著正相关，而与土壤温度无明显相关性，说明短期内影响侵蚀土壤呼吸速率日际变化的主要因子为土壤水分，温度对土壤呼吸作用的影响被湿度的影响所弱化。

（4）在计算坡面土壤 CO_2 排放时若忽视侵蚀的影响，将可能高估侵蚀引起的原位碳排放效应。严重表土侵蚀可能通过影响土壤呼吸而改变陆地生态系统碳循环。为了深入了解和评价侵蚀过程对土壤碳收支的影响，开展温度、湿度、表土侵蚀量等多因子交互作用下土壤呼吸的原位和异位侵蚀效应试验将是今后土壤碳循环研究的重点。

[参 考 文 献]

[1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):7-20.

[2] Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO_2 flux in a tallgrass prairie [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(2):221-228.

[3] Van Oost K, Quine T A, Gover G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle[J]. Science, 2007,318(5850): 626-629.

[4] 方华军，杨学明，张晓平，等. 土壤侵蚀对农田中土壤有机碳的影响[J]. 地理科学进展，2004,23(2):77-87.

[5] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京：科学出版社，2004.

[6] 赵护兵，刘国彬，曹清玉，等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式水土流失及养分保蓄效应研究[J]. 水土保持学报，2006,20(1):20-24,54.

[7] 李广，黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报，2009,25(11):85-90.

[8] 曹明奎，陶波，李克让，等. 1981—1998 年中国陆地生态系统碳通量的年际变化[J]. 植物学报，2003,46(5):552-560.

[9] Shen Weijun, Jenerette G D, Hui Dafeng, et al. Effects of changing precipitation regimes on dryland soil respiration and C pool dynamics at rainfall event, seasonal and interannual scales[EJ/OL]. [2008-12-16]. Journal of Geophysical Research, 113. G03024, doi: 10.1029/2008JG000685.

[10] Chen Shiping, Lin Guanghui, Huang Jianhui, et al. Responses of soil respiration to simulated precipitation pulses in semiarid steppe under different grazing regimes[J]. Journal of Plant Ecology, 2008,1(4):237-246.

（下转第 15 页）

[4] 王风,韩晓增,李海波,等. 不同黑土生态系统的土壤水分物理性质研究[J]. 水土保持学报,2006,20(6):67-70.

[5] 柳云龙,施振香,尹骏,等. 旱地红壤与红壤性水稻土水分特性分析[J]. 水土保持学报,2009,23(2):232-235.

[6] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:350-351.

[7] 安芷生,吴锡浩,汪品先,等. 最近 130 ka 中国的古季风Ⅱ:古季风变迁[J]. 中国科学(B):化学,1991,21(11):1209-1215.

[8] 鹿化煜,安芷生. 黄土高原粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学(D):地球科学,1998,28(3):278-283.

[9] 赵景波,顾静,杜娟. 关中平原第 5 层古土壤发育时的气候与土壤水环境研究[J]. 中国科学(D):地球科学,2008,38(3):364-374.

[10] Porter S C, An Zhisheng. Episodic gullying and paleomonsoon cycles on the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Research, 2005, 64(2): 234-241.

[11] Porter S C, An Zhisheng. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation[J]. Nature, 1995, 375(6529): 305-308.

[12] Kohfeld K E, Harrison S P. Glacial-interglacial changes in dust deposition on the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Review, 2003, 22(3): 1859-1878.

[13] 赵景波. 黄土的本质与形成模式[J]. 土壤学报,2002,39(4):459-466.

[14] 赵景波. 淀积理论与黄土高原环境演变[M]. 北京:科学出版社,2002.

[15] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of water Ⅰ:Redistribution [J]. Water Resourse Res, 1970, 6(3): 851-861.

[16] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Sci., 1974, 117(6): 311-314.

[17] Van Genuchten R. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5): 892-898.

[18] 肖建英,李永涛,王丽. 利用 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线[J]. 地下水,2007,29(5):46-47.

[19] 张玉龙. 关于土壤水分特征曲线空间变异性的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,1993.

[20] 窦建德,王绪芳,熊伟,等. 宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J]. 林业科学研究,2006,19(3):301-306.

[21] 西南农业大学. 土壤学:南方本[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社,1988:101-102.

(上接第 4 页)

[11] Liu Weixing, Zhang Zhe, Wan Shiqiang. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(1): 184-195.

[12] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO_2 flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. Global Change Biology, 2007, 13(2): 426-436.

[13] 贺金红,廖允成,胡兵辉,等. 黄土高原坡耕地退耕还林(草)的生态经济效应研究[J]. 农业现代化研究,2006,27(2):110-114.

[14] 王志强,刘宝元,王旭艳. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2009,39(10):1397-1412.

[15] Tang Xuli, Liu Shuguang, Zhou Guoyi, et al. Soil atmospheric exchange of CO_2, CH_4, and N_2O in three subtropical forest ecosystems in Southern China[J]. Global Change Biology, 2006, 12(3): 546-560.

[16] 刘光菘 . 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法:土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京:中国标准出版社,1996.

[17] Bajracharya R M, Lal R, Kimble J M. Diurnal and seasonal CO_2—C flux from soil as related to erosion phases in Central Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 286-293.

[18] Bodrlguez M L, Taboada M M. Sediment and phosphorus loss in runoff from an agroforestry catchment, NW, Spain [J]. Land Degradation and Development, 2010, 21(4): 161-170.

[19] Jacinthe P A, Lal R, Owens L B, et al. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics[J]. Soil Till. Res., 2004, 77(2): 111-123.

[20] Huxman T E, Turnipseed A A, Sparks J P, et al. Temperature as a control over ecosystem CO_2 fluxes in a high-elevation, subalpine forest [J]. Oecologia, 2003, 134: 537-546.