

黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系

魏孝荣^{1,2}, 邵明安^{1,2*}, 高建伦³

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 陕西省黄龙县气象局, 黄龙 715700)

摘要: 研究不同环境要素共同作用下的土壤有机碳分布特征及其与环境因素的关系对于全面准确评估黄土高原地区土壤有机碳状况和土壤碳循环具有重要意义. 结合野外调查和室内分析, 研究了黄土高原沟壑区典型小流域土壤不同组分有机碳分布特征及其与地形条件、土地利用方式和土壤类型之间的关系. 结果表明, 黄土沟壑区小流域土壤总有机碳变异较小(变异系数为 34%), 高活性有机碳变异较大(变异系数为 43%), 有机碳的变异性随其活性的增强而增大. 各组分有机碳之间极显著正相关, 而且在不同环境条件下的含量顺序一致. 各组分有机碳在不同地形条件下以塬面土壤最高, 沟道土壤最低; 在不同土地利用方式下以林地和农田土壤较高, 草地土壤较低; 在不同土壤类型中则以黑垆土最高, 红土最低. 不同环境条件下各组分有机碳之间的关系分析表明, 环境条件不但直接影响有机碳的分布, 还通过影响有机碳不同组分之间的关系来改变其分布特征. 研究区总有机碳与活性有机碳之间的关系受环境条件影响最大, 中活性与高活性有机碳之间的关系受环境条件影响最小.

关键词: 黄土沟壑区; 有机碳; 土地利用; 地形条件; 土壤类型

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2879-06

Relationships Between Soil Organic Carbon and Environmental Factors in Gully Watershed of the Loess Plateau

WEI Xiao-rong^{1,2}, SHAO Ming-an^{1,2}, GAO Jian-lun³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Huanglong Meteorological Office of Shaanxi Province, Huanglong 715700, China)

Abstract: Understanding the distribution of organic carbon fractions in soils and their relationships with environmental factors are very important for appraising soil organic carbon status and assessing carbon cycling in the Loess Plateau. In this research, through field investigation and laboratory analysis, we studied the relationships between soil organic carbon and environmental factors in a gully watershed of the Loess Plateau. The environmental factors are landforms, land use conditions and soil types. The results showed that total soil organic carbon presented less variance, while high labile organic carbon presented greater variance. The variation coefficients of them are 34% and 43%, respectively, indicating that the variability of organic carbon in soils increased with the increasing of their activities. Total soil organic carbon, labile organic carbon, middle and high labile organic carbon were highly interrelated and presented similar distribution trend with environmental factors. Among different landforms, land uses, and soil types, the highest contents of organic carbon in different fractions were observed in plateau land, forest and farm lands, and black loessial soils, while the lowest contents of them were observed in gully bottom, grass land, and rubified soils, respectively. The relationships between organic carbon and environmental factors indicate that environmental factors not only directly influence the distribution of soil organic carbon, but also indirectly influence them through affecting the relationships among organic carbon fractions. The relationship between total organic carbon and labile organic carbon responses rapidly to environmental factors, while that between middle labile organic carbon and high labile organic carbon responses slowly to environmental factors.

Key words: loessial gully watershed; soil organic carbon; land uses; landforms; soil types

土壤有机碳是土壤中较为活跃的部分, 其含量和动态在土壤质量演变和全球碳循环中起着十分重要的作用. 土壤活性有机碳是指土壤中转化快、稳定性差、易于氧化矿化、对植物和土壤微生物活性较高的那部分有机态碳, 它直接参与土壤生物化学过程, 是土壤微生物活动的能源和碳源, 也是土壤养分转化和循环的驱动力. 土壤有机碳含量及其活性受成土因素及人为活动长期相互作用的影响, 在表征土壤质量方面有着重要意义^[1~3]. 在土壤有机碳与环

境因素之间的关系研究方面, 国内外研究者就地形条件^[4~6]、土地利用^[3,7~10]和土壤类型^[2,11,12]等环境因素对土壤有机碳分布的影响已开展了大量的工作. 但为了便于比较, 研究者往往选取单一的环境因

收稿日期: 2007-10-11; 修订日期: 2008-01-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB106803); 中国科学院西部之光西部博士项目; 西北农林科技大学博士科研启动项目

作者简介: 魏孝荣(1978~), 男, 博士, 主要研究方向为土壤学, E-mail: xrwei78@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

素作为研究对象,而在多种环境因素共存条件下开展的工作较少,其研究成果在黄土高原地区的应用有所限制.

黄土高原地区是我国主要的农业生产区,也是我国西北生态环境脆弱区,该区土壤有机碳库及碳循环的变化不但影响到农业生产,而且关系到西部生态环境建设的成效^[13-15].黄土高原地区地形复杂,土地利用方式多变,土壤类型多样,而且该区土壤还遭受着不同程度的侵蚀.这些不同的环境条件往往同时存在,共同影响着土壤有机碳的分布.因此,要对该区土壤有机碳状况进行全面准确地评估,必须深入研究不同环境因素共同作用下的土壤有机碳的分布特征.本研究在位于黄土高原沟壑区的王东沟小流域选择了不同地形条件、土地利用方式和土壤类型,分析了土壤活性有机碳与这些环境因素的关系,以为合理评价黄土高原地区土壤碳循环提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在地处黄土高原南部的王东沟小流域进行.该小流域位于陕西省长武县境内,东经 107°40′30″~107°42′30″,北纬 35°12′~35°16′,海拔 800~1 200 m,属典型的黄土高原沟壑区,流域总面积 8.3 km².该流域气候属暖温带半湿润大陆型季风气候,多年平均气温 9.1℃,多年平均无霜期 171 d,≥0℃活动积温 3 866℃,≥10℃活动积温 3 029℃,多年平均降雨量为 584.1 mm,降水变率大,年内季节分布不均,主要集中在 7~9 月份.

1.2 样品采集与分析

根据 CERN 流域土壤样品采集要求,以比例为 1:7 500 的王东沟小流域地图为工作底图,于 2005 年 7 月采集小流域不同地形条件、不同土地利用方式和不同土壤类型条件下表层(0~20 cm)土壤样品 225 个,采样中考虑到样品的地块代表性,同一地块随机采取 5 个点组成混合土样.土壤样品风干、处理以供分析测定.所研究的小流域地形条件有塬面、坡地、梯田和沟道 4 类,土地利用方式有农地、林地、草地和果园 4 类,土壤类型有黑垆土、黄绵土和红土 3 类.本研究的样点布设情况如图 1 所示.

土壤总有机碳用 K₂CrO₇ 氧化法测定,土壤活性有机碳用 KMnO₄ 氧化法测定^[16],其操作步骤为:称取 2.500 g 土壤样品于 100 mL 塑料离心管中,加入 25 mL 不同浓度的高锰酸钾溶液,振荡 1 h,然后在

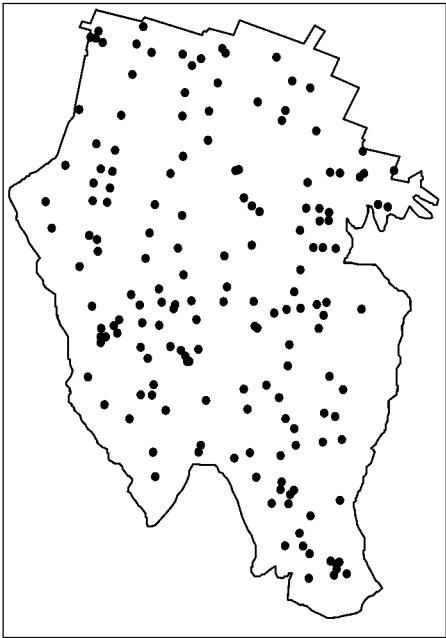


图 1 土壤样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the watershed

转速 4 000 r·min⁻¹ 下离心 5 min,将上清液稀释后在 565 nm 下测定吸光度,通过其与不加土壤的空白吸光度之差,计算出高锰酸钾浓度的变化,进而计算出氧化的有机碳即活性有机碳(氧化过程中 1 mmol KMnO₄ 消耗 0.75 mmol 或 9 mg C).试验中选择的 KMnO₄ 浓度为 333、167 和 33 mmol·L⁻¹,由此测定的有机碳分别为活性、中活性和高活性有机碳.

2 结果与分析

2.1 小流域范围内土壤有机碳含量特征

在一个完整的小流域内,由于成土母质分布、土壤发育程度、地形变异以及因此造成的小范围内水、热分布的差异,再加上土地利用、土壤侵蚀、植被类型等因素的影响,土壤有机碳差异很大(表 1).土壤总有机碳和不同活性有机碳的变异系数介于 34%~44%,表现出较大的变异性.土壤有机碳在小流域范围内的变化除与环境因素的影响有关外,还与有机碳活性的不同有关.

表 1 小流域土壤有机碳分布状况/g·kg⁻¹

Table 1 Distributions of organic carbon in surface soils of the watershed/g·kg⁻¹

组分	均值	最大值	最小值	标准差	变异系数/%
总有机碳	6.01	11.16	1.73	2.04	34
活性有机碳	1.16	2.20	0.41	0.42	36
中活性有机碳	0.80	1.72	0.24	0.35	44
高活性有机碳	0.44	0.85	0.06	0.19	43

本研究中,土壤总有机碳平均含量为 6.01 g•kg⁻¹,分别是活性、中活性和高活性有机碳的 5.2、7.5 和 13.7 倍.总有机碳变幅为 9.43 g•kg⁻¹,变异系数为 34%;活性有机碳变幅为 1.79 g•kg⁻¹,变异系数为 36%;中活性和高活性有机碳的变幅分别为 1.48 和 0.79 g•kg⁻¹,变异系数分别为 44%和 43%.可见在黄土沟壑区小流域,土壤总有机碳变异较小,高活性有机碳变异较大,即随着活性的增强,有机碳在土壤中的变异也在增大.这是因为活性有机碳是土壤中转化快、稳定性差、易于氧化矿化的那部分有机碳^[1~3],随着活性的增强,其受地形条件、土地利用方式、土壤类型等环境因素的影响就越大,从而表

现出较大的变异性,因此需要分析不同环境条件下各组分有机碳的分布特征.

2.2 小流域土壤有机碳与环境条件的关系

2.2.1 与地形条件的关系

地形条件支配着水、热资源的分配,影响着土壤的发育程度.水、热资源的分配直接左右着土壤中有有机物质的矿化和腐殖化过程,从而支配着不同地形条件下土壤有机碳的分布.王东沟小流域的地形条件主要有塬面、坡地、沟道和梯田,其面积分别占 35%、34%、9%、22%.不同地形条件下土壤有机碳含量有着显著差异(表 2).

本研究中不同地形条件下各组分土壤活性有

表 2 不同地形条件下土壤有机碳的分布及方差分析结果

Table 2 Distribution and variance analysis of organic carbon at different landforms

组分	塬面/g•kg ⁻¹		坡地/g•kg ⁻¹		沟道/g•kg ⁻¹		梯田/g•kg ⁻¹		平方和	均方	F	p
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差				
总有机碳	6.85 a	0.83	5.99 a	2.44	3.67 b	1.30	5.70 a	0.96	34.20	11.40	4.13	0.016
活性有机碳	1.37 a	0.25	1.17 a	0.50	0.72 b	0.34	1.09 ab	0.10	1.24	0.41	3.19	0.039
中活性有机碳	0.95 a	0.17	0.83 a	0.40	0.37 b	0.08	0.75 a	0.22	1.04	0.35	4.56	0.010
高活性有机碳	0.49 a	0.08	0.46 a	0.23	0.21 b	0.09	0.42 a	0.11	0.28	0.09	3.81	0.021

机碳呈现出相同的含量趋势,即塬面土壤含量最高,其次为坡地和梯田,沟道土壤含量最低.不同地形条件下土壤有机碳的差异由如下两方面原因引起.一是不同地形条件下土壤有机物料输入不同.塬面主要为农地,有机肥料投入量大,其土壤有机碳含量较高;梯田开垦后土壤贫瘠,而且梯田和坡地离居住地较远,有机肥料施用量少,土壤有机碳含量较低,沟道土壤无有机肥料施用,有机碳含量最低.二是不同地形条件下光、热、水资源分配不同.沟坡光、热资源优于塬面,而雨水资源劣于塬面(表 3),其土壤中有有机碳的矿化作用也因此强于塬面土壤,有机碳含量较低.由于不同活性有机碳含量之间有着极显著的

正相关关系(表 4),因此总有机碳、活性有机碳、中活性和高活性有机碳在各地形条件下的含量顺序一致(表 2).

表 3 塬面和沟坡光热水资源比较¹⁾

Table 3 Comparison of light, heat and rainfall resources in plateau land and gully land

地形	年均温 /℃	6~8 月 日均温 /℃	年降雨 量/mm	4~10 月 降雨量 /mm	年日照 时数/h	4~10 月 日照时 数/h
塬面	9.1	20.0	737.6	667.3	1 677.6	969.2
沟坡	10.0	20.7	677.1	613.1	1 784.4	1 030.4

1)引自文献[17]

表 4 不同活性土壤有机碳之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among different soil organic carbon fractions

项目	总有机碳 × 活性有机碳	总有机碳 × 中活性有机碳	总有机碳 × 高活性有机碳	活性有机碳 × 中活性有机碳	活性有机碳 × 高活性有机碳	中活性有机碳 × 高活性有机碳
r	0.717	0.930	0.974	0.754	0.723	0.975
p	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1

2.2.2 与土地利用的关系

土地利用方式作为人类利用土地各种活动的综合反映,其变化不仅可以改变土地覆被状况,如地表植被的变化,影响植物凋落物和残余量,还会引起土

壤管理措施的改变,从而导致土壤有机碳和其活性的变化^[3,7~10].王东沟流域的土地利用类型主要有农地、果园、林地和草地,其中农地种植冬小麦、夏玉米,果园栽培苹果,林地主要为成年和幼龄刺槐林,

草地则为天然草地和人工草地,4 种土地利用类型占的比例分别为 46%、15%、32% 和 7% . 方差分析结果表明,不同土地利用方式下土壤总有机碳、中活性和高活性有机碳的差异均达到显著水平(表 5).

表 5 不同土地利用类型下土壤有机碳的分布及方差分析结果

组分	林地/g•kg ⁻¹		草地/g•kg ⁻¹		农田/g•kg ⁻¹		果园/g•kg ⁻¹		平方和	均方	F	p
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差				
总有机碳	6.58 a	2.32	4.32 b	1.71	6.74 a	1.06	6.26 a	1.06	34.30	11.43	4.14	0.015
活性有机碳	1.32 a	0.58	0.98 a	0.39	1.28 a	0.23	1.00 a	0.08	0.77	0.26	1.76	0.178
中活性有机碳	0.93 a	0.45	0.57 b	0.26	0.90 a	0.19	0.75 ab	0.18	0.71	0.24	2.69	0.045
高活性有机碳	0.51 a	0.22	0.29 b	0.16	0.49 a	0.10	0.44 ab	0.09	0.27	0.09	3.71	0.023

各组分土壤有机碳随土地利用的变化趋势一致,即林地和农地含量最高,其次为果园,草地最低.这是因为农地有作物根系和残茬存留,又有有机肥料施入,林地有大量林木的枯枝落叶归还到土壤中,所以农地和林地土壤有机碳高于其它土地利用方式土壤.果园土壤虽然没有枯枝落叶的归还,但仍然有少量的有机肥料使用,而且施入果园的氮磷肥量很大,氮磷肥可以促进土壤有机碳含量的增加^[18~21],故其土壤有机碳含量也较高.草地土壤无有机肥料投入,而通过草叶凋落归还到土壤中的有机物料量很有限,其土壤有机碳含量最低.

2.2.3 与土壤类型的关系

土壤类型不同,其成土母质、成土过程、土壤性质也不同,生长在其上的植被类型及植物对土壤有机碳的影响也不同.王东沟流域土壤可分为 3 类,即

黑垆土、黄绵土和红土.黑垆土是主要的农业土壤,成土过程以腐殖质累积、石灰淋溶、粘化和熟化为特点,面积占流域总面积的 42.4%,主要分布于塬面;黄绵土是在黄土母质上直接发育的幼年土壤,其面积占流域总面积的 37.5%,分布于坡台、山涧地;红土是在离石黄土红色条带上发育的土壤(红色土),或者黄土与红土混杂形成的土壤(二色土),主要分布于沟道,多为荒草地和林地,面积占流域面积的 20.1%^[17].不同类型土壤之间各组分土壤有机碳有着显著的差异(表 6),这与成土过程有关.研究区 3 种土壤成土过程中的腐殖化作用强弱为黑垆土>黄绵土>红土^[17],而成土过程中的腐殖化作用决定了土壤中有机碳水平,所以有机碳在不同土壤中的含量便呈现出了表 6 所示的分布趋势.

2.3 环境条件对各组分有机碳之间关系的影响

表 6 不同土壤类型下土壤有机碳的分布及方差分析结果

组分	黑垆土/g•kg ⁻¹		黄绵土/g•kg ⁻¹		红土/g•kg ⁻¹		平方和	均方	F	p
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差				
总有机碳	6.82 a	0.87	6.23 a	1.78	4.36 b	1.95	35.23	17.61	6.64	0.004
活性有机碳	1.24 a	0.24	1.12 a	0.42	1.00 a	0.49	0.31	0.15	0.95	0.399
中活性有机碳	0.87 a	0.17	0.83 ab	0.33	0.59 b	0.36	0.50	0.25	2.72	0.042
高活性有机碳	0.49 a	0.08	0.46 a	0.17	0.31 b	0.20	0.21	0.11	4.15	0.026

由于不同组分有机碳之间有着极显著的线性关系(表 4),因此可以通过分析不同环境条件下土壤各组分有机碳之间线性关系的变化来解释环境条件对其的影响.对于线性关系而言,因变量与自变量的截距和斜率可以很好地反映线性关系的变化,不同地形条件、土地利用方式以及土壤类型下各组分土壤有机碳之间线性关系的截距和斜率见表 7,可见它们之间的关系因环境条件的不同差异很大.

在不同地形条件下,总有机碳与 3 种活性有机碳的斜率均以坡地最高,塬面和沟道较高,梯田最低;而截距却与此相反,以坡地最低,梯田最高,塬面

和沟道介于二者之间.4 种地形条件下活性有机碳与中活性和高活性有机碳的斜率顺序为塬面>沟道>坡地>梯田,截距呈现出与此相反的趋势.中活性与高活性有机碳的斜率和截距差异不大.4 种地形条件下总有机碳与活性有机碳的斜率和截距差异最大,中活性与高活性有机碳的斜率和截距差异最小,表明地形条件对总有机碳与活性有机碳之间关系的影响最大,对中活性与高活性有机碳之间关系的影响最小.

对于不同土地利用方式而言,总有机碳与不同活性有机碳的斜率以草地和农地较高,林地和果园较低,而截距则以草地和农地较低,林地和果园较

高;活性有机碳与中活性和高活性有机碳的斜率以农地最高,果园最低,截距以果园最高,农地最低;中活性与高活性有机碳的斜率以林地较大,其它土地利用方式较小,截距与此相反.4 种利用方式下总有机碳与活性有机碳的斜率和截距差异最大,中活性与高活性有机碳的斜率和截距差异最小,表明土地利用方式对总有机碳与活性有机碳之间关系的影响最大,对中活性与高活性有机碳之间关系的影响最小.

在 3 种类型土壤中,不同活性有机碳之间的斜率整体上以黄绵土较高,黑垆土较低,而截距则与此

相反,以黑垆土较高,黄绵土较低,而且不同类型土壤中总有机碳与活性有机碳的斜率和截距差异最大,中活性与高活性有机碳的斜率和截距差异最小,表明土壤类型也对总有机碳与活性有机碳之间关系的影响最大,对中活性与高活性有机碳之间关系的影响最小.

通过上述分析发现,环境条件除直接影响土壤有机碳分布外,还通过影响不同组分之间的关系来影响其分布特征,而且环境条件对总有机碳与活性有机碳之间关系的影响最大,对中活性与高活性有机碳之间关系的影响最小.

表 7 不同环境条件下土壤活性有机碳之间的关系

Table 7 Relationships among different organic carbon fractions at different environmental factors

因变量	自变量	参数	地形条件				土地利用方式				土壤类型		
			塬面	坡地	沟道	梯田	林地	草地	农地	果园	黑垆土	黄绵土	红土
总有机碳	活性有机碳	斜率	3.01	4.19	3.98	-5.76	3.53	4.25	3.80	-8.69	1.18	3.88	3.25
		截距	3.22	0.69	0.98	12.00	2.01	0.38	1.88	14.99	5.35	1.92	1.26
		r	0.77	0.78	0.90	0.62	0.88	0.79	0.91	0.66	0.32	0.85	0.76
总有机碳	中活性有机碳	斜率	5.08	6.00	5.17	4.23	4.86	6.00	5.74	4.99	4.36	5.39	4.90
		截距	2.38	0.72	1.74	2.51	2.00	0.93	1.56	2.53	3.02	1.79	1.47
		r	0.92	0.98	0.91	0.95	0.97	0.96	0.97	0.85	0.84	0.98	0.93
总有机碳	高活性有机碳	斜率	10.47	11.15	9.92	8.19	9.93	11.61	10.62	9.95	9.79	10.85	9.50
		截距	1.72	0.89	1.52	2.28	1.43	0.99	1.50	1.87	2.03	1.29	1.44
		r	0.97	0.99	0.96	0.93	0.98	0.99	0.98	0.88	0.92	0.98	0.98
总有机碳	中活性有机碳	斜率	1.25	0.92	0.99	-0.23	1.03	0.91	1.25	-0.14	0.76	1.00	0.93
		截距	0.09	0.50	0.37	1.27	0.33	0.48	0.14	1.11	0.58	0.32	0.43
		r	0.86	0.80	0.77	0.49	0.83	0.78	0.88	0.32	0.54	0.83	0.76
活性有机碳	高活性有机碳	斜率	2.30	1.63	1.84	-0.56	2.10	1.67	2.32	-0.38	1.47	2.00	1.63
		截距	0.05	0.56	0.34	1.33	0.22	0.52	0.12	1.17	0.52	0.23	0.49
		r	0.83	0.77	0.79	0.59	0.83	0.77	0.90	0.44	0.51	0.82	0.72
中活性有机碳	高活性有机碳	斜率	1.81	1.81	1.78	1.89	2.00	1.84	1.78	1.86	1.92	1.99	1.80
		截距	-0.02	0.05	0.00	-0.04	-0.10	0.04	0.02	-0.07	-0.07	-0.08	0.04
		r	0.95	0.99	0.98	0.95	1.00	0.98	0.98	0.96	0.94	0.99	0.98

3 结论

(1) 黄土沟壑区小流域土壤总有机碳变异较小,高活性有机碳变异较大,其变异性随有机碳活性的增强而增大.各组分土壤有机碳之间极显著正相关,而且在不同环境条件下的含量顺序一致.各组分有机碳在不同地形条件下的含量顺序为塬面>坡地、梯田>沟道;在不同土地利用方式下的含量顺序为林地、农田>果园>草地;在不同类型土壤中的含量顺序为黑垆土>黄绵土>红土.

(2) 环境条件不但直接影响土壤有机碳的分布,还通过影响不同有机碳组分之间的关系来影响其分布特征.环境条件对总有机碳与活性有机碳之间关系的影响最大,对中活性与高活性有机碳之间

关系的影响最小.

参考文献:

[1] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J].生态学杂志,1999,18(3):32-38.

[2] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.

[3] Grandy A S, Robertson G P. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms [J]. Ecosystems, 2007, 10: 58-73.

[4] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock [J]. Current Science, 2005, 88: 25-35.

[5] 彭佩钦,刘强,黄道友,等.湖南典型农田土壤有机碳含量及其演变趋势[J].环境科学,2006,27(7):1319-1322.

[6] 涂成龙,刘丛强,武永锋.退耕弃荒洼地土壤有机碳在生态

- 系统转化过程中的动态变化[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 1912-1917.
- [7] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fractions through soil profiles [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**: 660-667.
- [8] Martens D A, Reedy T E, Lewi S D A. Soil organic carbon content and composition of 130-year crop, pasture and forest land-use managements [J]. Global Change Biology, 2003, **10**: 65-78.
- [9] Jiang P K, Xu Q F, Xu Z H, *et al.* Seasonal changes in soil labile organic carbon pools within a *Phyllostachys praecox* stand under high rate fertilization and winter mulch in subtropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2006, **236**: 30-36.
- [10] 周涛, 史培军. 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(2): 138-143.
- [11] Canham C D, Pace M L, Papaik M J, *et al.* A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack Lakes [J]. Ecological Applications, 2004, **14**: 839-854.
- [12] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡地黑土有机碳分布特征与土壤碳损失量计算[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(1): 81-84.
- [13] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 等. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(6): 103-106, 132.
- [14] 刘守赞, 郭胜利, 王小利, 等. 植被对黄土高原沟壑区坡地土壤有机碳的影响[J]. 自然资源学报, 2005, **20**(4): 529-536.
- [15] 徐香兰, 张科利, 徐宪立, 等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报, 2003, **17**(3): 13-15.
- [16] Blair G J, Lefroy R, Whitbread A, *et al.* The development of the KMnO₄ oxidation technique to determine labile carbon in soil and its use in a carbon management index [A]. In: Lal R, Kimble J M, Follett R F, *et al.* (eds). Assessment Methods for Soil Carbon [C]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 2001. 323-337.
- [17] 郝明德, 梁银丽. 长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
- [18] 魏孝荣, 郝明德, 张春霞. 黄土区长期定位培肥试验对土壤肥力的影响[J]. 水土保持研究, 2003, **10**(1): 37-39.
- [19] Hu S, Coleman D C, Carroll C R, *et al.* Labile soil carbon pools in subtropical forest and agricultural ecosystems as influenced by management practices and vegetation types [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1997, **65**: 69-78.
- [20] Ni J, Xu J, Xie Z, *et al.* Changes of labile organic carbon fractions in soils under different rotation systems [J]. Pedosphere, 2004, **14**: 103-109.
- [21] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, *et al.* Influence of fertilization and organic amendments on organic-carbon fractions in Heilu soil on the loess plateau of China [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2005, **168**: 100-107.