

黄土丘陵区小流域表层土壤的有机碳密度及其空间分布

王小利^{1,2,3}, 段建军^{2,3}, 郭胜利^{1,2}

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 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;
3 贵州大学 生命科学学院, 贵州 贵阳 550025)

[摘要] 通过野外调查和室内分析, 采用多元线性逐步回归和地理信息系统(GIS)相结合的方法, 研究了黄土丘陵区燕沟流域表层(0~20 cm)土壤的有机碳密度、空间分布及其与土地利用类型和地形因子等的关系。结果表明, 流域表层土壤有机碳密度平均为 1.72 kg/m^2 , 变幅为 $0.97 \sim 2.93 \text{ kg/m}^2$; 土地利用类型是影响土壤有机碳密度变化的首要因子; 流域土壤有机碳密度呈镶嵌的树枝状和条带状空间分布格局, 其高值斑块区与乔木林地和灌木林地的分布一致, 中值斑块区与草地和川坝地的分布一致, 低值斑块区与梯田、果园、坡耕地、疏林地和未成林地的分布一致。流域表层土壤有机碳总储量为 $76.81 \times 10^3 \text{ t}$ 。

[关键词] 黄土丘陵区; 土壤有机碳密度; 燕沟流域

[中图分类号] S153.6⁺2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)10-0098-05

Organic carbon density of top soil and its spatial distribution of small watershed in hilly region of loess plateau

WANG Xiao-li^{1,2,3}, DUAN Jian-jun^{2,3}, GUO Sheng-li^{1,2}

(1 College of Resources & Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3 College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: Based on field survey and laboratory analysis, by using multi-linear stepwise regression and geographic information system (GIS), the paper studied the spatial distribution of surface soil (0-20 cm), organic C density in the Yangou watershed of loess hilly-gully region and its relationships with land use, landform, and so on. The results showed that the surface soil organic C density ranged from $0.97 \sim 2.93 \text{ kg/m}^2$, with an average about 1.72 kg/m^2 in the watershed; the most important influential factor of soil organic C density was land use; the spatial distribution map of soil organic C density showed apparent arborization and strip. The "hot spots" of high soil organic C density were consistent with the distributions of arbor and bush land, those of low soil organic C density were consistent with the distributions of the terrace, orchard, slope farmland, sparse woodland and new woodland and those of middle soil organic C density were consistent with the distributions of the grassland and plain land. The total soil organic C storage of topsoil in the watershed was about $76.81 \times 10^3 \text{ t}$.

Key words: hilly region of loess plateau; soil organic carbon density; Yangou watershed

[收稿日期] 2006-05-23

[基金项目] 中国科学院西部之光项目; 中国科学院水土保持研究所领域前沿项目

[作者简介] 王小利(1979-), 女, 山西柳林人, 副教授, 博士, 主要从事区域土壤养分循环与优化管理研究。

[通讯作者] 郭胜利(1969-), 男, 河北栾城人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤养分与生态研究。E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

土壤有机碳的空间分布是研究土壤生产力、土壤水文特性和以碳为基础的温室气体收支平衡的基础资料^[1]。从全球和区域尺度上的研究结果来看,土壤有机碳储量和分布的估算结果往往存在较大的差异。例如,全球陆地生态系统 1 m 土层有机碳的储量估算值为 1 115 ~ 2 293 Pg^[2-4],对我国陆地生态系统土壤有机碳储量的估算值为 50 ~ 186 Pg^[5-7]。土壤是一个不均一、具有高度空间异质性的复合体。土壤有机碳的含量与分布受气候、植被、母质、地形、土地利用方式等多种因子的影响。揭示局域尺度上土壤有机碳空间分布及其影响因素,有助于提高大尺度上估计的精确性。

西北黄土高原地区,水土流失严重,地形破碎,土地利用类型复杂多样。黄土高原的区域治理以小流域为单元而进行,小流域内土壤有机碳的空间变异受所在区域的气候、土壤母质、植被类型影响。除此之外,地形和土地利用方式也是影响小流域土壤有机碳空间变异的重要因素。20 世纪 90 年代以来,黄土高原地区进行了大规模的基本农田建设、退耕还林(果)还草以及封山育林等综合治理。小流域的地形和土地利用方式发生了显著变化,但对小流域尺度土壤有机碳空间分布格局研究较少。本文以燕沟小流域为对象,研究了小流域尺度土壤有机碳的储量和空间变化及其影响因素。

1 研究区概况

研究的小流域为延安市燕沟流域(36°28′00″~36°32′00″N, 109°20′00″~109°35′00″E),总面积约 47 km²,海拔 986 ~ 1 425 m,以梁峁地貌为主,沟壑密度为 4.8 km/km²,属典型黄土丘陵区。研究区气候为暖温带半湿润向半干旱过渡的类型,年平均气温 9.8℃,多年平均降雨量约 558 mm。土壤为半熟化状态的黄绵土,肥力较低。植被类型多样,所处区域属暖温带阔叶林向温带草原过渡地带。人工植被主要树、草种为:刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L)和沙打旺(*erectmilkvetch*)等;天然植被主要树、草种为:辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*S. viciifolia*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等^[8]。流域内土地利用类型包括川坝地、梯田、坡耕地、果园、乔木林地、灌木林

地、疏林地、未成林地和草地等(图 1)。治理前(1997 年以前)流域水土流失面积 42.55 km²,占总面积的 88.65%,土壤侵蚀模数为 9 000 t/(km²·年),属强度水土流失地区^[9]。



图 1 燕沟流域 2003 年土地利用图

Fig. 1 Land use map of Yangou watershed in 2003

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集与分析

根据研究区在气候和植被上的过渡性特征,于 2005-05 在流域尺度上选取不同气候和植被的 3 个典型区域:樱桃沟和九沟支流域(上游)、康家圪崂支流域(中游)、吴枣园和赵庄(下游)进行试验。于各区域选取地形和地貌近似的治理坡段,采集不同土地利用类型的表层(0 ~ 20 cm)土壤样品,共计 168 个。各点以 GPS 定位,植被群落调查采用陆地生物群落典型样方调查方法^[10]进行。土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾外加热氧化法^[11]。将采样点的定位数据导入 GIS 软件中,经 ArcInfo 投影转换(投影类型为阿尔伯斯投影,中央子午线为 109°26′15.00″),生成以米(m)为单位的平面坐标,最后生成样点分布图(图 2)。

2.2 土壤有机碳密度和储量估算

2.2.1 土壤有机碳多元线性回归方程的建立 以不同土地利用方式和坡向的土壤平均有机碳含量作为其编码值,将字符型变量(土地利用类型和坡向)转换为数值型变量(表 1)。以土地利用类型、坡度、坡向、

高程和投影转换后的经、纬度为自变量,土壤有机碳含量为应变量,利用 SPSS13.0 软件统计分析并建立其多元线性回归模型(变量进入方程的条件是回归系数的显著性水平 $P<0.05$,剔除的条件是 $P>0.10$)。

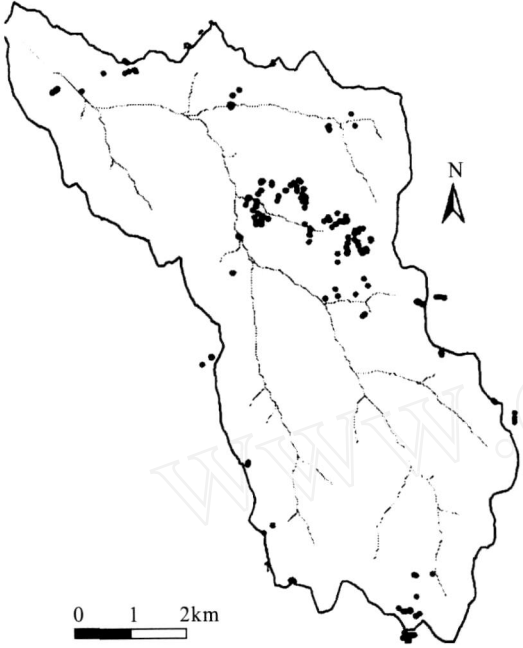


图 2 燕沟流域 0~20 cm 表层土壤样点的分布

Fig. 2 Sample points of soil in Yangou watershed

表 1 燕沟流域土地利用类型和坡向的编码值

Table 1 Coding values of land use and aspect in Yangou watershed

土地利用类型和坡向 Land use	编码值 Coding value	土地利用类型和坡向 Aspect	编码值 Coding value
梯田 Terrace	3.77	西南 Southwest	3.78
果园 Orchard	4.33	东南 Southeast	4.34
坡耕地 Slope land	4.42	平地 Plain	4.53
疏林地 Sparse woodland	4.91	南 South	5.84
未成林地 New woodland	5.03	东北 Northeast	7.08
草地 Grassland	6.51	西北 Northwest	7.08
川坝地 Plain land	7.45	西 West	7.33
乔木林地 Arbor land	10.88	东 East	7.37
灌木林 Bush land	11.99	北 North	10.24

3 结果与分析

3.1 燕沟流域不同土地利用类型表层土壤的有机碳密度

流域土壤有机碳含量(y)与土地利用类型(x_1)、坡向(x_2)、坡度(x_3)、高程(x_4)、经度(x_5)和纬度(x_6)6个因素变量存在如下回归方程:

$$y = 2\,299.454 + 0.895x_1 + 0.448x_2 - 0.000\,452\,755x_5 - 0.000\,599\,097x_6$$
$$(R = 0.688^{**}, n = 168) \tag{3}$$

由表 2 可知,土壤有机碳与土地利用类型、坡向、纬度极显著相关,与经度显著相关,其中土地利

2.2.2 土壤有机碳密度和储量的计算 燕沟流域不同土地利用方式下,0~20 cm 表层土壤有机碳密度和储量的计算公式为:

$$C_i = d_i \times \rho_i \times O_i, \tag{1}$$

$$S_i = A_i \times C_i \tag{2}$$

式中: i 为第*i*个土地利用类型,本研究中*i*=9; C_i 为土壤有机碳密度; d_i 为土层厚度,本研究中 $d_i = 20\text{ cm}$; ρ_i 为平均土壤容重,本研究中 ρ_i 取黄绵土的平均容重 1.19 g/cm^3 ^[12]; O_i 为土壤有机碳含量; S_i 为土壤有机碳储量; A_i 为各土地利用类型的面积。

2.2.3 土壤有机碳密度空间分布图的绘制 从流域数字高程模型上提取信息,绘制流域的坡度图、坡向图、经度图和纬度图。利用软件 ArcGIS 9.0 的图层运算(Raster calculate)功能,将坡度图、经度图、纬度图及编码(编码值×100)后的土地利用图和坡向图按照建立的多元线性回归方程进行叠加运算,运算结果自动生成流域的土壤有机碳密度空间分布图。根据土壤有机碳含量空间分布图,对不同土地利用类型的土壤有机碳含量进行统计,根据公式(1)和(2)分别计算各土地利用类型的土壤有机碳密度和储量。

用类型的影响最大,其标准化回归系数为 0.537,其余变量影响大小依次为纬度、坡向和经度,其标准化回归系数分别为 - 0.313,0.192 和 - 0.142。表 3 显示,燕沟流域表层土壤有机碳平均含量为 $7.23 \pm 3.41\text{ g/kg}$,土壤有机碳密度为 $0.97 \sim 2.93\text{ kg/m}^2$,平均值为 1.72 kg/m^2 。不同土地利用类型,乔木林地和灌木林地土壤有机碳密度较高,均大于 2.40 kg/m^2 ;川坝地和草地土壤有机碳密度次之,分别为 1.71 和 1.53 kg/m^2 ;梯田、果园、坡耕地、疏林地、未成林地的土壤有机碳密度均较低,为 $0.97 \sim 1.26\text{ kg/m}^2$ 。

表 2 燕沟流域土壤有机碳与土地利用类型、坡向、经度、纬度的相关性检验

Table 2 Test of the relations between SOC and land use , aspect , longitude , latitude in Yangou watershed				
预测变量 Forecast variable	非标准化回归系数 Nonstandardized regression coefficient	标准化回归系数 Standardized regression coefficient	T 值 T value	显著性 Significance
常量 Constant	2299.454		4.385	0.000
土地利用类型 Land use	0.895	0.537	8.848	0.000 **
坡向 Aspect	0.448	0.192	3.123	0.002 **
经度 Longitude	- 0.000452755	- 0.142	- 2.004	0.047 *
纬度 Latitude	- 0.000599097	- 0.313	- 4.393	0.000 **

注：*和 ** 分别表示相关性达到显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 水平。
Note: *and ** mean significant correlations at the levels of 0.05 and 0.01 , respectively.

表 3 燕沟流域表层土壤有机碳的密度和含量

Table 3 Density and storage of soil organic C (0 ~ 20cm) in Yangou watershed						
土地利用类型 Land use	面积/ hm ² Area	面积比例/ % Area proportion	土壤有机碳含量/ (g · kg ⁻¹) SOC	土壤有机碳密度/ (kg · m ⁻²) C density	土壤碳储量/ (×10 ³ t) C storage	储量比例/ % C storage proportion
梯田 Terrace	582.00	13.0	4.09 ±1.43	0.97	5.66	7.4
果园 Orchard	666.92	14.9	4.59 ±1.62	1.09	7.29	9.5
坡耕地 Slope land	127.64	2.9	4.70 ±1.43	1.12	1.43	1.9
疏林地 Sparse woodland	338.76	7.6	5.12 ±1.18	1.22	4.13	5.4
未成林地 New woodland	471.25	10.6	5.29 ±1.72	1.26	5.93	7.7
草地 Grassland	615.02	13.8	6.41 ±1.64	1.53	9.39	12.2
川坝地 Plain land	216.03	4.8	7.18 ±1.63	1.71	3.69	4.8
乔木林地 Arbor land	662.54	14.8	10.37 ±1.52	2.47	16.3	21.3
灌木林地 Bush land	783.94	17.6	12.29 ±1.45	2.93	22.93	29.9
平均 * Mean			7.23 ±3.41	1.72		
合计 Sum	4 464.10	100			76.81	100

注：*表示以面积为权重。Note: * means taking area as weight.

表 1,3 表明,流域土壤有机碳含量呈沿梯田 - 果园 - 坡耕地 - 疏林地 - 未成林地 - 草地 - 川坝地 - 乔木林地 - 灌木林地逐渐增加的趋势;北坡(阴坡)土壤有机碳含量显著高于南坡(阳坡)。

3.2 燕沟流域表层土壤有机碳密度的空间分布特征

图 2 和图 3 显示,燕沟流域土壤有机碳密度呈镶嵌的树枝状和条带状的空间分布格局,与土地利用类型有密切关系。其高值斑块区与乔木林地和灌木林地的分布一致,中值斑块区与草地和川坝地的分布一致,低值斑块区与梯田、果园、坡耕地、疏林地和未成林地的分布一致,这充分反映了土地利用类型对流域土壤有机碳的影响。从空间上看,燕沟流域南部的有机碳密度高于北部,西部略高于东部,沟道是有机碳密度的主要高值区之一。

3.3 燕沟流域表层土壤有机碳储量的估算

表 3 显示,以 4 464.10 hm² 流域面积计算,燕沟流域土壤有机碳总储量约为 76.81 ×10³ t。灌木林和乔木林地的土壤有机碳储量较高,其面积分别占流域总面积的 17.6 %和 14.8 %,土壤有机碳储量分别占总储量的 29.9 %和 21.3 %。其次为草地,其面积比例为 13.8 %,土壤有机碳储量比例为

12.2 %。果园、未成林地、梯田、疏林地、川坝地和坡耕地的面积之和占流域总面积比例为 53.8 %,而土壤有机碳储量比例仅为 36.6 %。

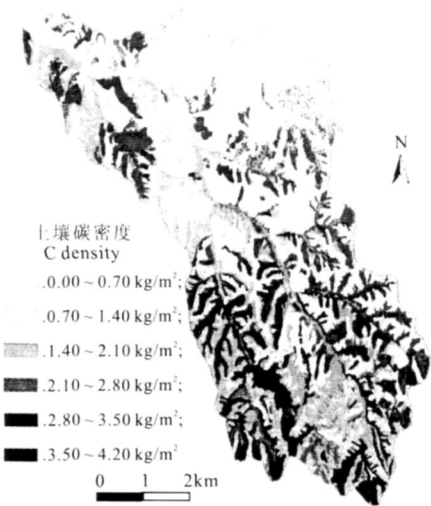


图 3 燕沟流域 0 ~ 20 cm 表层土壤有机碳密度的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of SOC density (0 ~ 20 cm) in Yangou watershed
燕沟流域表层土壤有机碳密度小于平均值1.72

kg/m² 的土壤面积约为 3017.62 hm², 约占总面积的 67.6%。说明流域大部分土壤的有机碳含量低, 流域土壤碳库总储量较小。

4 讨 论

燕沟流域土壤有机碳密度稍大于黄土高原地区黄绵土类有机碳平均密度(1.408 kg/m²), 小于黄土高原地区平均土壤有机碳密度(2.49 kg/m²)^[12] 和全国平均土壤有机碳密度 10.53(kg/m²)^[7]。该流域土壤有机碳密度存在明显的空间变异性。

土壤有机碳密度的空间分布主要与地形、土地利用类型、植被以及人为活动等因素有关。一般地, 灌木林和乔木林分布在梁峁坡和沟谷内, 地上部生物量和新鲜有机物质的输入量很高。草地主要分布在梁峁坡和沟谷内, 草种主要包括铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等, 郁闭度 ≥30%。梯田分布于坡度较缓的梁峁顶部, 全部由坡地开垦而来。修筑梯田时扰乱了土壤层次及作物根茬还田量低可能是导致梯田表层土壤有机碳含量小的主要原因^[13]。与峁顶梯田相比, 沟谷川坝地粘粒和水分含量高, 这有助于作物生长和有机碳的积累。果园表层土壤有机碳密度偏低, 这与刘守赞等^[14]的研究结果相一致。其原因除了与物理扰动影响有关外, 还可能与当地群众对果园施肥习惯有关(当地果园一般采用穴施或沟施)。坡耕地属于黄土高原的低产田之一, 其土壤侵蚀量是茂密林地的 5~10 倍^[15], 基本没有秸秆还田和有机肥的施入, 土壤有机碳积累很慢, 且易分解和侵蚀, 故有机碳密度很低。

此外, 土壤有机碳密度的空间分布与流域综合治理措施的空间配置密切相关。从解放后到 80 年代中期, 人口增长等原因导致该流域坡耕地开荒增加、天然次生林向南部缩减。1997 年以来, 燕沟流域集中进行了以基本农田建设、退耕还林(果)还草以及封山育林为主的综合治理, 显著降低了流域输沙模数^[16]。在流域南部、中部和北部分别配置了不同的综合治理措施, 南部以涵养水源的天然次生林为主、中部以人工水土保持植被为主、北部以农田林果植被为主^[8]。图 2 和图 3 显示, 流域南部土壤有机碳密度较高, 这与其治理措施以天然次生林为主相一致。流域中部和北部土壤有机碳密度的零星高值斑块与人工水土保持林的分布相一致。如流域西北部的赵庄村栽有一片 30~35 年生的刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)和小叶杨林(*Pobulus simonii*),

流域中部的吴枣园峁顶栽有一片约 18 年生的人工刺槐林^[17], 这些区域的土壤有机碳密度明显高于周边地区。由于流域中部的生态农业模式是以果园为主^[18], 而果园受人为扰动强烈, 故其表层土壤有机碳密度相对较低。

综上所述, 燕沟流域土壤有机碳密度的空间分布主要与地形、土地利用类型、植被、流域综合治理措施等因素的空间分布相一致。

5 结 论

(1) 燕沟流域表层土壤有机碳密度为 0.97~2.93 kg/m², 其平均值为 1.72 kg/m²。土壤有机碳受土地利用类型的影响最大, 其余变量影响大小依次为纬度、坡向和经度。土壤有机碳密度呈镶嵌的树枝状和条带状的空间分布格局。

(2) 燕沟土壤有机碳总储量为 76.81 ×10³ t, 表层土壤有机碳密度小于平均值 1.72 kg/m² 的土壤面积约占流域总面积的 67.6%。

(3) 燕沟流域土壤有机碳储量较高的是灌木林和乔木林地, 主要分布在流域南部; 果园、未成林地、疏林地、梯田、川坝地和坡耕地的土壤有机碳储量较低。合理利用和保护现有乔木林地, 防止滥垦滥伐, 增施有机肥、化肥以及秸秆还田等措施, 是提高燕沟流域土壤有机碳密度的重要措施。

致谢: 感谢中国科学院水土保持与生态环境研究中心区域水土保持与环境研究室的杨勤科研究员为本研究提供了 DEM 和土地利用图等基础图件!

[参考文献]

- [1] Kern J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 439-455.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298(8): 156-159.
- [3] Eswaren H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 192-194.
- [4] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. Eur J Soil Sci, 1996, 47: 151-163.
- [5] 方精云. 中国陆地生态系统的碳库[C]//温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 123-126.
- [6] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量的研究[J]. 科技通报, 1999, 15(5): 330-332.
- [7] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544.

(下转第 109 页)

- 地区农业研究,1996,14(4):30-33.
- [8] 刘晓宏,郝明德,田梅霞. 土壤矿质氮和可矿化氮对当季作物的贡献[J]. 土壤与环境,2001,10(3):207-209.
- [9] 付会芳,张兴昌. 旱地土壤氮素矿化的动力学研究[J]. 干旱区资源与环境,1997,11(1):53-57.
- [10] Schinner, Kandeler, Margesin, et al. Methods in Soil Biology [M]. Berlin:Springer-Verlag,1995:139-141.
- [11] Campbell C A. Soil organic carbon, nitrogen and fertility [M]// Schnitzer M, Han S U. Soil Organic Matter. Amsterdam:Elsevier,1978:174-271.
- [12] Keeney D R. Nitrogen availability indices [M]// Page A L, Miller R H, Keeney D R. Methods of Soil Analysis, part 2. 2th. Madison:Am Soc Agron & Soil Sci Soc Am,1992:711-733.
- [13] Loll M J, Bollag J M. Protein transformation in soil [J]. Adv Agron,1983,36:351-381.
- [14] Waring S A, Bremner J M. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as index of nitrogen availability [J]. Nature,1964:201:951-952.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:147-195.
- [16] 周建斌,李生秀. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(3):299-304.
- [17] Moore S, Stein W H. Photometric ninhydrin method for use in the chromatography of amino acids [J]. J Biol Chem,1948,176:367-388.
- [18] Joergensen R G. Quantification of microbial biomass by determining ninhydrin-reactive N [J]. Soil Biol Biochem,1996:28:301-306.
- [19] 贺发云,尹斌,蔡贵信,等. 菜地和旱作粮地土壤氮素矿化和硝化作用的比较[J]. 土壤通报,2005,36(1):41-44.
- [20] 金雪霞,范晓晖,蔡贵信,等. 菜地土壤氮素矿化和硝化作用的特征[J]. 土壤通报,2004,36(4):382-386.

(上接第 102 页)

- [8] 杨光,薛智德,梁一民. 陕北黄土丘陵区植被建设中的空间配置及其主要建造技术[J]. 水土保持研究,2000,7(2):136-139.
- [9] 徐勇, Roy C S. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控[J]. 地理学报,2001,56(6):657-666.
- [10] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析 [M]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 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.
- [13] 张成娥,王栓全,邓西平. 燕沟流域农田基础肥力分析与培肥途径[J]. 水土保持通报,1999,19(5):16-20.
- [14] 刘守赞,郭胜利,王小利,等. 植被对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] 田均良,梁一民,刘普灵. 黄土高原丘陵区中尺度生态农业建设探索:重塑黄土地系列丛书 [M]. 郑州:黄河水利出版社,2003.
- [16] 琚彤军,刘普灵,郑世清,等. 燕儿沟流域泥沙监测初报[J]. 水土保持研究,2000,7(2):176-178.
- [17] 薛智德,杨光,梁一民,等. 燕儿沟人工植被营造模式与快速建设研究[J]. 水土保持研究,2000,7(2):128-132.
- [18] 刘普灵,郑世清,琚彤军,等. 黄土高原燕沟流域生态环境建设模式及效益研究[J]. 水土保持研究,2005,12(5):88-91.