黄土丘陵区纸坊沟小流域土壤有机碳储量研究

侯晓瑞[1], 薛志婧[1], 程 曼[1], 安韶山[1,2]

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过野外调查和室内分析,研究了黄土丘陵区纸坊沟小流域不同土地利用方式下土壤有机碳的剖面变化特征及土壤有机碳储量。结果表明,该流域各层土壤的有机碳含量为中等变异,土壤有机碳含量随土层深度的增加而减少。0—60 cm 土层有机碳储量为 4.73×10^4 t,天然草地和林地的储量较高,占总储量的 80%。不同土地利用方式下,流域内的土壤有机碳含量差异显著,表现为: 天然草地 > 灌木林地 > 乔木林地 > 川坝地 > 梯田 > 坡耕地 > 撂荒地 > 果园。

关键词: 黄土丘陵区; 小流域; 土壤有机碳; 土地利用

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2012)02-0021-05 **中图分类号:** S153.6+21

Soil Organic Carbon Storage in Zhifanggou Watershed of Loess Hilly Region

HOU Xiao-rui[1], XUE Zhi-jing[1], CHENG Man[1], AN Shao-shan[1,2]

(1. *College of Resources and Environmental Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Instititue of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Through the field survey and laboratory analysis, soil profiles with various land uses were characterized regarding soil organic carbon variations and storages in the Zhifanggou watershed in the loess hilly region. The results show that the soil organic carbon contents in different soil layers varied moderately, increasing with soil depth, in the study area. Approximately 4.73×10^4 t soil organic carbon was stored in 0—60 cm soils in the watershed, which was mainly distributed in natural grassland and forest, accounting for 80% of the total amount. Under different types of land use, the soil organic carbon content in the Zhifanggou watershed differed significantly, in a descending order as: natural grassland > shrub > forest > dammed valley > terrace farmland > slope land > abandoned land > orchard.

Keywords: loess hilly region; small watershed; soil organic carbon; land use

土壤是陆地生态系统中最大且周转时间最慢的碳库,而土壤碳主要以有机碳形式存在[1]。土壤有机碳库既是碳汇又是碳源,对土壤质量和生态环境特别是气候变化都有重大影响[2-3]。土地利用结构调整能改变土壤有机质的输入,从而改善土壤质量,影响着土壤有机碳的分解速率,控制着陆地生态系统中碳的含量和转化[4-5]。因此,研究不同土地利用方式对有机碳的影响对于合理利用土地,减缓土壤有机碳释放,科学认识陆地生态系统碳循环规律及制定应对气候变暖政策具有积极意义。

黄土高原地形破碎,长期受人类活动扰动,不合理的土地利用造成植被退化严重、水土流失严重,是我国重点生态脆弱区[6],也是我国土壤有机碳储量最低的地区之一[7]。减少人类活动影响,植被自然恢复和人工植被重建是黄土丘陵区生态恢复的主要措施,也是该区域生态恢复的重要途径[8]。该地区通过大规模的生态环境修复,在坡耕地和荒地植被重建和恢复后,不仅会改变地区的生态环境,也会使土壤碳库发生重大变化,进而影响区域碳平衡和气候变化[8-11]。目前,在黄土丘陵区,对土壤有机碳的研究主要集中在植被恢复类型、土地利用方式和地形因子对有机碳空间异质性的影响上。贾宇平[12]运用地统计学方法估算了黄土高原典型沟壑区砖窑沟小流域土壤总碳储量。徐香兰等[13]根据第二次土壤普查资料和土壤类型图,计算了黄土高原地区表层土壤有机碳密度和储量。魏孝荣[14]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。本研究

收稿日期: 2011-08-03 **修回日期:** 2011-10-09

资助项目: 国家自然科学基金重点项目"黄土丘陵区土壤侵蚀对植被恢复过程的干扰与植物的抗侵蚀特性研究"(41030532; 41171226); 西北农林科技大学"优秀人才科研专项(QN2011049)

作者简介: 侯晓瑞(1986—),女(汉族),山西省繁峙县人,硕士研究生,研究方向为地理信息系统。E-mail: hxr86@126.com。

通信作者: 安韶山(1972—),男(汉族),宁夏自治区平罗县人,博士,副研究员,主要研究方向为土壤生态学、流域生态与管理。E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn。

以黄土丘陵区经30 a高度治理的纸坊沟小流域为研究单元，分析不同土地利用方式下土壤有机碳的分布特征及其有机碳储量，以期为进一步调整土地利用结构、优化植被恢复措施提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省安塞县纸坊沟流域，流域地理位置为109°13′46″—109°16′03″E，36°46′42″—36°46′28″N；流域面积8.27 km^2，海拔1 010～1 431 m，流域为由南向北流向的狭长条带状，沟道长8.1 km。在气候区划上该区属暖温带半干旱气候，年平均气温8.8 ℃，年均降雨量549.1 mm。土壤类型以黄土母质发育而成的黄绵土为主，抗冲蚀能力差[15]。植被类型处于暖温带阔叶林向干草原过渡的森林草原带。该区域水土流失严重，是生态环境恢复与重建的重点区域[16-17]。经过30 a的水土保持综合治理，通过退耕还林还草措施，有效遏制了水土流失，成功恢复了退化生态系统，流域生态经济系统进入良性循环阶段[15]。区内主要植被类型有刺槐(*Robinia pseud-oacacia*)，柠条(*Caragana korshinskii*)，沙棘(*Hippo-phae rkamnoides*)，铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)，长芒草(*Stipa bungeana*)，白羊草(*Bothriochloa ischae-mum*)，狗尾草(*Setaria viridis*)等。

2 材料与方法

于2010年8—9月在陕西省安塞县纸坊沟流域进行野外采样。基于小流域内的地形和土地利用两大因素，综合考虑土地利用方式，植被恢复年限、坡向、坡度等因子，采用非等间距不规则网格布点法，各土地利用类型均布设6—8个点，同时使用GPS记录采样点的经纬度和海拔。在选取的样地上随机钻取土样6次，土层分为3层(0—10 cm，10—30 cm，30—60 cm)。用环刀采集各层原状土壤，每层重复两次，烘干称重，获得各土层的土壤容重。将新鲜土样混合均匀后、风干、磨细过筛后，采用H_2SO_4—K_2CrO_7外加热法测定土壤有机碳。

流域不同土地利用方式下有机碳密度(SOC_D)计算公式为：

$$SOC_D = \sum_{i=1}^{m} SOC_i \times BD_i \times D_i \quad (1)$$

式中：SOC_i——各层有机碳含量；BD_i——各层容重；D_i——土层厚度；m——土层数。

流域不同土地利用方式下有机碳储量(T_{SOCD})计算公式为：

$$T_{SOCD} = \sum_{j}^{n} ASOCD_j S_j \quad (2)$$

式中：$ASOCD_j$——各类土地利用类型的平均土壤有机碳密度；S_j——该类型土地面积；n——土地利用类型总数。

以纸坊沟2000年土地利用图为底图，对1∶1万航空相片目视解译，结合野外实地校验，在ArcGIS 9.2软件中数字化生成纸坊沟2010年土地利用现状图。研究区主要土地利用类型包括：灌木林地、乔木林地、梯田、坡耕地、坝地(包括一些沟谷平地)、果园、天然草地、撂荒地、其它用地(包括水域和居民点)。每一样点属性包括土地利用方式，经纬度，海拔，各层有机碳含量、有机碳密度和容重。所有数据采用Excel 2003和SPSS 17.0软件进行统计和分析。

3 结果与分析

3.1 描述性统计分析

纸坊沟流域土壤有机碳属性的描述性统计分析详见表1。由表1可以看出，研究区土壤有机碳含量平均值介于6.12～9.31 g/kg，随土层深度的增加而减小；土壤容重平均值变化范围为1.14～1.28 g/cm^3，随着土层加深，土壤容重逐渐增大。

变异系数C_v是表征土壤性质空间变异程度强弱的统计量[18]，一般认为，$C_v < 0.1$为弱变异性，$0.1 \leqslant C_v \leqslant 1.0$时为中等变异性，$C_v > 1.0$时为高度变异性[19]。从变异系数来看，各层土壤的有机碳含量为中等变异，而容重分别为0.09，0.09和0.05，均小于0.1，属于弱变异，这与前人研究结果一致[20]。经单样本K—S检验，所测数据呈现正态分布规律。

表1 纸坊沟流域土壤有机碳的描述性统计

项目	土层深度/cm	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数	K—S检验	样本数
有机碳含量/($g \cdot kg^{-1}$)	0—10	19.04	2.77	9.31	3.97	0.43	0.08	60
	10—30	14.21	3.10	6.95	2.25	0.32	0.32	60
	30—60	11.22	2.27	6.12	2.06	0.34	0.71	60
容重/($g \cdot cm^{-3}$)	0—10	1.34	0.86	1.14	0.10	0.09	0.93	60
	10—30	1.66	1.00	1.22	0.11	0.09	0.26	60
	30—60	1.48	1.19	1.28	0.06	0.05	0.14	60

3.2　不同土地利用方式下土壤容重变化

土壤容重是表征土壤紧实度的指标,也是表征土壤质量的重要参数[21]。土壤容重越小,表明土壤越疏松,孔隙愈多; 反之则表明土壤土体紧实,结构性差,孔隙少[22]。表 2 反映了流域内不同土地利用方式下土壤容重的变化,土壤容重均随着土层深度的增加而增加。在 0—10 cm 土层,土壤容重大小顺序表现为: 坝地 > 果园 > 撂荒地 > 天然草地 > 坡耕地 > 梯田 > 林地 > 灌木林地,林地和梯田、撂荒地和果园土壤容重差异不显著,其它地类表层土壤容重差异均达到显著水平($p < 0.05$)。10—30 cm 的土壤容重大小表现为: 坝地 > 撂荒地 > 天然草地 > 坡耕地 > 梯田 > 灌木林地、林地 > 果园; 30—60 cm 土层土壤容重大小依次为: 坝地 > 果园 > 撂荒地、天然草地 > 灌木林地、林地 > 梯田 > 坡耕地。不同土地利用方式下 0—10 cm 土层土壤容重差异相对较大,10—30 cm 和 30—60 cm 土壤容重表现出基本相似的规律,除坝地外差异均不显著,这可能与该地区成土母质均匀单一有关。3 个土壤层次坝地的容重均为最高,这是由于坝地地势低洼,淤积冲蚀泥沙,土壤较为板结,容重较大[23],撂荒地可能由于受到人和牲畜踩踏,所以容重值也相对较高。

表 2　纸坊沟流域不同土地利用方式土壤容重变化

土地利用类型	0—10 cm	10—30 cm	30—60 cm
天然草地	1.19 ± 0.07^{abA}	1.25 ± 0.03^{bA}	1.29 ± 0.09^{bA}
灌木林地	1.06 ± 0.10^{cC}	1.19 ± 0.08^{bB}	1.28 ± 0.06^{bA}
乔木林地	1.11 ± 0.10^{bcC}	1.19 ± 0.11^{bB}	1.28 ± 0.05^{bA}
川坝地	1.25 ± 0.04^{aB}	1.37 ± 0.06^{aA}	1.38 ± 0.08^{aA}
梯 田	1.12 ± 0.04^{bcB}	1.23 ± 0.09^{bA}	1.27 ± 0.04^{bA}
坡耕地	1.17 ± 0.11^{abcA}	1.24 ± 0.08^{bA}	1.24 ± 0.06^{bA}
撂荒地	1.21 ± 0.12^{abA}	1.27 ± 0.18^{abA}	1.29 ± 0.08^{bA}
果 园	1.22 ± 0.04^{abA}	1.18 ± 0.08^{bA}	1.30 ± 0.02^{bA}

注: 表中行内相同大写字母表示同一土地利用方式不同土层土壤容重差异不显著,列中相同小写字母表示不同土地利用方式同一土层差异不显著($p < 0.05$)。

3.3　不同土地利用方式对土壤有机碳含量的影响

土地利用变化影响土壤有机碳的输入和输出,而输入和输出又决定了土壤有机碳含量[24]。从图 1 可以看出,各土地利用类型的土壤有机碳含量均呈现随土层深度增加而降低的规律,但是下降幅度存在差异。表层(0—10 cm)是土壤有机碳含量随土地利用变化的敏感层,果园的平均含量最低,为 5.65 g/kg,天然草地(15.02 g/kg)、灌木林地(10.74 g/kg)、林地(9.94 g/kg)、坝地(9.61 g/kg)、梯田(7.87 g/kg)、坡耕地(7.70 g/kg)、撂荒地(6.27 g/kg),分别是果园土地有机碳含量的 2.7,1.9,1.8,1.7,1.4 和 1.1 倍。天然草地土壤有机碳含量明显高于其它利用方式,坝地、梯田、坡耕地三者之间差异不显著,与撂荒地和果园差异显著。10—30 cm 土层 SOC 含量表现为: 天然草地 > 坝地 > 灌木林地 > 林地 > 坡耕地 > 梯田 > 果园 > 撂荒地,天然草地和坝地 SOC 含量较高,灌木林地和林地、梯田、坡耕地之间差异不大,撂荒地和果园之间无显著性差异。在 30—60 cm 土层,不同土地利用方式之间 SOC 含量的趋势与 10—30 cm 土层一致,天然草地与坝地之间差异显著,灌木林地和林地、梯田、坡耕地之间无明显差异,但是与撂荒地和果园差异显著。随着流域退耕还林还草措施的进一步实施,当土地利用方式由农地和果园向林、草地转变时,土壤有机碳的累积会得到显著提高。

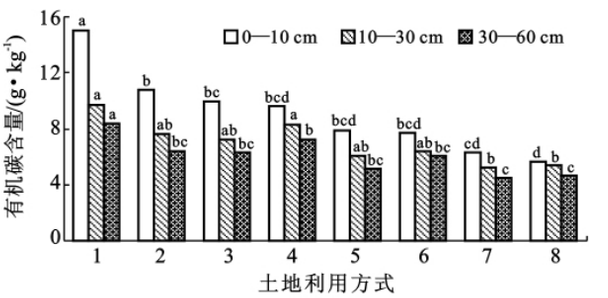


图 1　纸坊沟流域不同土地利用方式土壤有机碳含量分布

注: 1 天然草地; 2 灌木林地; 3 乔木林地; 4 川坝地; 5 梯田; 6 坡耕地; 7 撂荒地; 8 果园。

3.4　纸坊沟小流域 0 – 60 cm 土壤有机碳储量估算

运用 ArcGIS 对各土地利用类型图斑面积进行统计,纸坊沟流域 0—60 cm 土壤有机碳总储量为 4.73×10^4 t。从表 3 结果来看,研究区 0—60 cm 土层的土壤有机碳密度为天然草地最高,其次是川坝地,灌木林地和林地,梯田和坡耕地居中,果园和撂荒地最低。这反映了土地利用类型对流域土壤有机碳的影响。天然草地和林地的土壤有机碳储量较高,其面积分别占流域面积的 27.36% 和 49.05%,土壤有机碳储量分别占总储量的 36.81% 和 44.69%。其次为灌木林地和梯田,其面积比例分别为 5.65% 和 6.77%,土壤有机碳储量比例为 5.39% 和 5.10%。坡耕地、川坝地、果园、撂荒地的面积之和占流域总面积的 11.18%,土壤有机碳储量比例为 7.81%。

4　结果讨论

土壤有机碳储量动态变化受气候、植被、土壤属性以及农业经营实践等多种因素的影响[25]。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,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

有机碳储量的变化[26]。大量研究表明[27-28]，毁林或改变林地利用现状会造成20%～50%的土壤有机碳损失，草地开垦损失量达30%～50%。本研究几种利用方式中，灌木林地容重相对最低，基本农田和撂荒地较高。李新宇等[29]对怀来县盆地不同土地利用方式下土壤质量的研究认为，灌木林地容重较低，农地土壤原有结构在一定程度上被破坏，土壤容重增加，这与本研究结果一致。天然草地由于长期免受扰动，其土壤有机碳含量明显高于其它土地利用方式，而且天然植被植物多样性丰富，发达的根系密集于表层[30]，地上大量凋落物和根系分泌物是其土壤有机碳主要输入形式。据王小利等[31]的研究，川坝地相对平坦，侵蚀较弱，富集了从坡面水土流失的黏粒物质，利于土壤有机碳的累积。撂荒地由于杂草根系分布较浅，在下层土壤的有机碳含量低，这也可能与所选样区的撂荒年限较短有关。果园有机碳各层含量都相对较低，这与果园深翻造成土体疏松、土壤有机碳易于矿化分解[32]、施肥较少的管理方式有关，且果园林下草本植物缺乏，不利于土壤有机物质输入。研究结果反映出黄土丘陵沟壑区通过退耕还林还草、封山育林等调整土地利用结构等措施可以促进土壤有机碳的累积，使退化生态系统逐步恢复。

表3 纸坊沟流域0－60 cm土壤有机碳储量

土地类型	面积/m^2	面积比例/%	土壤有机碳密度/($kg \cdot m^{-2}$)	土壤有机碳储量/t	储量比例/%
天然草地	2 265 212.73	27.36	7.69±1.07	17 419.49	36.81
灌木林地	468 010.49	5.65	5.45±0.66	2 550.66	5.39
乔木林地	4 061 620.73	49.05	5.23±0.66	21 242.28	44.89
梯 田	560 223.79	6.77	4.31±0.53	2 414.56	5.10
坡耕地	22 791.22	0.28	4.83±0.73	110.08	0.23
川坝地	56 371.58	0.68	6.54±0.90	368.67	0.78
果 园	375 280.76	4.53	3.78±0.56	1 418.56	3.00
撂荒地	470 858.16	5.69	3.82±0.49	1 798.68	3.80
合 计	8 280 369.46	100.00		47 322.98	100.00

5 结 论

(1) 对纸坊沟小流域土壤有机碳的研究表明，各土层土壤的有机碳含量为中等变异，容重为弱变异，土壤有机碳含量随深度增加而减少，容重随土层加深而呈逐渐增加且不同土地利用方式下各容重差异不显著。

(2) 不同土地利用方式下，纸坊沟流域土壤有机碳含量差异显著，天然草地含量最高，灌木林地和乔木林地次之，撂荒地和果园较低。

(3) 纸坊沟流域0—60 cm土壤有机碳总储量为4.73×10^4 t，储量较高的是天然草地和林地，占总储量的80%，显示出较强的固碳潜力。退耕还林还草使得林草面积大幅增加，生态环境质量逐步提高。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] Torn M S，Trunbore S E，Chadwick O A，et al. Mineral control of soil organic carborn storage and turnover[J]. Nature，1997，389(6647)：170-173.

[3] Doran J W，Jones A J，Arshad M A，et al. Determinants of Soil Quality and Health，Soil Quality and Soil Erosion[M]. Boca Raton：CRC Press，1999：17-36.

[4] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International，2003，29(4)：437-450.

[5] Smith，P. Carbon sequestration in croplands：The potential in Europe and the global context[J]. European Journal of Agronomy，2004，20(3)：229-236.

[6] Liu Guobin，Xu Mingxiang，Ritsema C. A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly，gullied area on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena，2003，54(1/2)：31-44.

[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.

[8] Chen Liding，Gong Jie，Fu Bojie，et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area，loess plateau of China[J]. Ecological Research，2007，22(4)：641-648.

[9] Post W M，Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change：Processes and potential[J]. Global Change Biology，2000，6(3)：317-327.

[10] Wang Yafeng，Fu Bojie，Lü Yihe，et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau，China[J]. Catena，2011，85(1)：58-66.

[11] 彭文英，张科利，杨勤科. 退耕还林对黄土高原地区土

壤有机碳影响预测 [J]. 地域研究与开发,2006,25(3):94-99.

[12] 贾宇平,马义娟. 黄土高原小流域土壤总碳分布与储量研究 [J]. 水土保持通报,2005,25(5):17-24.

[13] 徐香兰,张徐彭. 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(03):13-15.

[14] 魏孝荣,邵明安,高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系 [J]. 环境科学,2008,29(10):2879-2883.

[15] 薛萐,刘国彬,戴全厚,等. 黄土丘陵区人工灌木林恢复过程中的土壤微生物生物量演变 [J]. 应用生态学报,2008,19(3):517-523.

[16] 李育材. 退耕还林还草工作回顾与总体思路 [J]. 林业经济,2001,22(9):3-9.

[17] 徐勇,田均良,沈洪泉,等. 生态重建模式的评价方法:以黄土丘陵区为例 [J]. 地理学报, 2004,59(4):621-628.

[18] 肖波,王庆海,尧水红,等. 黄土高原东北缘退耕坡地土壤养分和容重变异特征研究 [J]. 水土保持学报,2009,23(3):92-96.

[19] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征 [J]. 水土保持学报,2004,18(3):53-56.

[20] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[21] 王莉,张强,牛西午,等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响 [J]. 中国农业生态学报,2007,15(4):53-56.

[22] 周萍,刘国彬,侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究 [J]. 水土保持学报,2008,22(1):7-12.

[23] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征 [J]. 生态学报,2006,26(3):647-654.

[24] 吴建国,张小全,徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳储量的影响 [J]. 应用生态学报,2004,15(4):593-599.

[25] 苏永忠,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展 [J]. 中国沙漠,2002,22(3):220-228.

[26] 龙健,黄昌勇,李娟. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响 [J]. 水土保持学报,2006,16(1):7679.

[27] Silveria A M, Victoria R L, Baliester M V, et al. Simulation of the effects of land use changes in soil carbon dynamics in the Piracicaba river basin, Sao Paulo State, Brazil [J]. Brasileira, 2000,35(2):389-399.

[28] Davidson E A, Ackeman I K. Changes in carbon inventories following cultivation of previously untilled soil [J]. Biogeochemistry, 1993,20(2):161-193.

[29] 李新宇,唐海萍,赵云龙,等. 怀来盆地不同土地利用方式对土壤质量的影响分析 [J]. 水土保持学报,2004,18(6):103-107.

[30] Smith J L, Paul E A. The Significance of Soil Microbial Biomass Estimations [M] //Bollag J M, Stotzky G. Soil Biochemistry. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991:359-396.

[31] 王小利,段建军,郭胜利. 黄土丘陵区小流域表层土壤有机碳密度及其空间分布 [J]. 西北农林科技大学学版:自然科学版,2007,3(10):98-102.

[32] 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.

(上接第 20 页)

[11] 吉久昌,郭跃东,郭晋平,等. 文峪河上游河岸林群落类型及其生态适应性 [J],生态学报, 2009, 29(3):1587-1595.

[12] 白晋华, 朱宝才, 郭晋平. 关帝山林区文峪河流域植被景观空间格局研究 [J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2004,24(3) , 229-233,248.

[13] Lowrance R, Altier L S, Williams R G, et al. The riparian ecosystem management model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000,55(1):27-34.

[14] Robert P G, James A E, Elaine R I, et al. Chemistry and microbial activity of forest and pasture riparian-zone soils along three Pacific Northwest streams [J]. Plant and Soil, 1997, 190(1):169-178.

[15] 黄玲玲. 竹林河岸带对氮磷截流转化作用的研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.

[16] Nguyen L, Smith C M, Cooper A B. Impact of cattle treading on hill land: Soil physical properties and contaminant runoff [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1998,41(2): 279-291.