

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.009

汉江余姐河小流域土地利用 对土壤粉粘粒分布的影响研究

胡克志¹, 李占斌^{2,3}, 李鹏², 徐国策², 袁水龙², 王添², 王丹²

(1. 陕西省水土保持生态环境监测中心, 陕西 西安 710004;

2. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了研究汉江流域土地利用对土壤粉粘粒分布的影响, 使用统计学及地统计学方法对 3 个土层的粉粘粒数据进行分析。结果表明: 研究区 3 个土层的粉粘粒含量表现为 $0 \sim 20 \text{ cm}(A_1) < 20 \sim 40 \text{ cm}(A_2) < 40 \sim 60 \text{ cm}(A_3)$, 变异系数分别为 13%、4% 和 14%, 均属中等变异。三个土层的粉粘粒最优半方差模型均为指数模型, 空间分布也都表现为中等空间相关。方差分析表明, 在农地、林地、草地三种土地利用类型下, 只有 A_3 层粉粘粒含量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。另外, A_1 、 A_2 、 A_3 层之间的粉粘粒含量存在极显著差异 ($P < 0.01$)。余姐河流域 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土壤粉粘粒储量为 10.21 万 t, 其中农地、林地、草地的粉粘粒储量分别为 3.44 万 t、3.23 万 t 和 3.54 万 t。

关键词: 土壤粉粘粒; 土地利用; 空间变异; Kriging 插值

中图分类号: S714.7

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)02-0180-06

Research on the influence of land use on distribution of clay and silt in the Yujiehe Watershed of the Hanjiang River

HU Kezhi¹, LI Zhanbin^{2,3}, LI Peng², XU Guoce², YUAN Shuilong², WANG Tian², WANG Dan²

(1. Shannxi Monitoring Center of Soil and Water Conservation and Eco-environment, Xi'an 710004, China;

2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on

the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: In the study of the influence of land use on the distribution of the clay (CS) and silt in the Hanjiang River, the traditional statistics and geostatistics method were used to analyse the silt and clay data of three layers. The results indicated that the contents of CS among the three soil layers were $A_1 < A_2 < A_3$ with coefficient variation of 13%, 14% and 14% respectively, which all belonged to moderate variability. The optimal semi variance model of three soil layers was exponential model and the spatial distribution was also characterized by medium spatial correlation. The variance analysis showed that significant difference ($P < 0.05$) of CS content existed only in A_3 for different land use (cropland, forestland, grassland), while the CS among different layers showed extremely significant difference ($P < 0.01$). The CS storage in Yujiehe Watershed in $0 \sim 60 \text{ cm}$ layer was $1.02 \times 10^6 \text{ t}$, with $3.44 \times 10^5 \text{ t}$, $3.23 \times 10^5 \text{ t}$ and $3.54 \times 10^5 \text{ t}$ in cropland, forestland and grassland respectively.

Key words: clay and silt; land use; spatial variations; Kriging interpolation

土壤的颗粒级配不仅影响土壤的水力学特性, 而且影响土壤的肥力状况以及土壤侵蚀强度等, 是土壤重要的物理指标之一^[1-3]。在水蚀过程中, 土壤中的细颗粒最容易流失, 同时伴随着养分的流失, 不

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401316); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JQ5175); 陕西水利科技计划资助项目(2014slkj-13)

作者简介: 胡克志, 男, 高级工程师, 研究方向为水文、泥沙分析和水土保持监测等。E-mail: hkz0809@126.com

通讯作者: 李占斌, 男, 博导, 教授, 博士, 研究方向为土壤侵蚀和水土保持。E-mail: zbli@ms.iswc.ac.cn

同的土地利用类型对水土流失有不同的拦截效果^[4-5],颗粒级配特征能够反映不同土地利用方式对土壤侵蚀的影响。有研究发现,坡地流失泥沙中大量富集小于0.02mm的粉粘粒^[6-7]。侵蚀往往导致由粉粒和粘粒组成的泥沙细颗粒和养分的富集^[8-9]。土壤中细颗粒的流失使得土壤中粉粘粒储量下降,不仅造成土壤肥力降低,同时还造成大量营养元素流失,导致河流湖泊的富营养化。近年来,许多学者利用地统计学方法对土壤性质的空间变异进行了研究^[10-13],但是土地利用对小流域土壤粉粘粒空间变异特征影响的研究还鲜见报道。本文以余姐河小流域为研究区,采用网格法和分层方式,运用地统计学的方法,研究了该区的土壤粉粘粒含量的空间变异特征,并估算了土壤粉粘粒的储量。以期为汉江流域水土流失防治与水环境保护政策制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

余姐河小流域位于陕西省安康市汉滨区大同、恒口两镇境内(E108°48′15″~108°48′42″,N32°44′55″~32°45′13″),余姐河属汉江一级支流月河左岸二级支流,流域总面积0.141 km²,河道平均比降39.2%。流域土壤主要为母岩风化的岩屑,杂以少量砂质粘土构成石碴土。流域内植被为次生林,乔、冠混交,针、阔叶混交。上游植被较好,耕地分散,下游植被差,耕地相对集中,以坡耕地为主。流域多年平均降雨量850 mm,实测最大年降水量为1 156 mm,最小降水量561.5 mm。降水量年内分配不均,一般夏季多雨,冬春偏少,7~10月(丰水期)降水量占全年降水量的65%,11月到次年3月(枯水期)占全年降水量不足10%。

1.2 土壤样品的采集与测定

2013年12月,在对研究区进行实地勘察的基础上,结合当地的地形及土地利用方式,以30 m×30 m的网格进行土壤样品采集,采样点共计185个,并用GPS定位采样点的坐标,如图1所示。采样深度60 cm,每个采样点分别按0~20 cm(A₁),20~40 cm(A₂),40~60 cm(A₃)分层采集土样,装袋后带回实验室分析。

将土样自然晾干,过2 mm筛子后,使用马尔文激光粒度仪经超声波震荡15 s后测量土壤粒径的体积分数(%)。根据美国农业部分类标准,土壤颗粒可以分为极粗砂粒(2~1 mm)、中粗砂粒(1~0.25 mm)、细砂粒(0.25~0.05 mm)、粉粒(0.05

~0.002 mm)和粘粒(<0.002 mm)。所以粒径设为2~1 mm(d_1)、1~0.5 mm(d_2)、0.5~0.25 mm(d_3)、0.25~0.1 mm(d_4)、0.1~0.05 mm(d_5)、0.05~0.002 mm(d_6)和小于0.002 mm(d_7)7级。

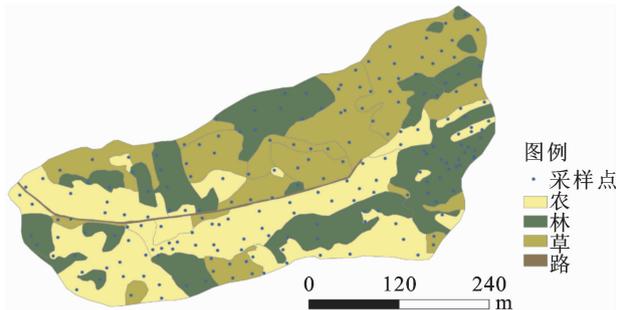


图1 研究区土地利用及样点分布图

Fig. 1 Land use types and distribution of sampling sites in the study area

1.3 数据分析与处理方法

采用SPSS16.0软件对样本进行统计和相关性分析,采用ArcGIS(10.1)制作空间分布图,采用GS+(7.0)进行半方差函数计算。

半方差函数公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $z(x_i)$ 为随机变量 Z 在点 x_i 处的值; $z(x_i + h)$ 为 Z 在距离点 x_i 为 h 远处的值, $N(h)$ 为滞后距离为 h 时的样本对数。

参照有机碳储量的计算方法^[14]估算粉粘粒储量:

$$C_k = 10d_k p_k w_k \quad (2)$$

$$S_k = A_k C_k \quad (3)$$

式中, C 为土壤粉粘粒密度(kg/m²), k 为土壤不同层次, d 为土层厚度(cm), p 为土壤容重(g/cm³), w 为土壤粉粘粒质量分数(%), A 为各土地利用类型所占面积, S 为土壤粉粘粒储量。

2 结果与分析

2.1 土壤粉粘粒的统计特征

余姐河流域不同深度下土壤粉粘粒含量的统计特征如表1所示。

表1 余姐河流域不同深度下土壤粉粘粒含量的统计特征
Tab. 1 Statistical characteristics of CS content at different soil depths in Yujiehe watershed

土层	均值	标准差	最小值	最大值	K-S(P)	CV/%
A ₁	79.15	10.21	52.88	97.55	1.06	13
A ₂	80.70	11.30	41.40	98.11	1.10	14
A ₃	82.98	11.34	50.48	99.86	1.22	14

由表 1 可以得出,不同深度下土壤粉粘粒含量的平均值随土壤深度的减小而减小。这种现象与土壤侵蚀关系密切,因为土壤侵蚀主要发生在土壤的表层,而且在侵蚀过程中,小粒径的土壤颗粒更容易被径流携带迁移^[15-16],而中等或较大粒径被保留在土壤中。三个土层的粉粘粒含量极差表现为 $A_2 > A_3 > A_1$ 。表层由于受人体的翻耕作用影响,土壤的粉粘粒分布更均匀,故极差最小。根据 Nielson 和 Bouma (1985) 的分类系统:弱变异 $CV \leq 10\%$,中等变异 $10\% < CV < 100\%$,强变异 $CV \geq 100\%$ ^[17]。故由表 1 可知,三个土层的变异系数均属中等变异。

使用正态分布数据进行 Kriging 插值预测效果最好,故对数据进行 K-S 检验,由表 1 可知 A_1 、 A_2 、 A_3 层的 P 值都大于 0.05,说明 A_1 、 A_2 和 A_3 层的粉粘粒数据都服从正态分布。

2.2 土壤粉粘粒的空间特征分析

为了进一步分析土壤粉粘粒的空间结构,采用软件 GS+7.0 对三个土层粉粘粒的数据进行分析,图 2 为半方差函数图,表 2 为余姐河流域不同深度土壤粉粘粒含量的地统计学参数。由表 2 知,三个土层指数模型的拟合优度(R^2)分别是 0.823、0.816 和 0.708,残差平方和(RSS)是 308、797 和 863。最高的拟合程度及比较小的残差平方和表明指数模型

可以很好地描述该地区土壤粉粘粒的空间结构特征。三个土层的变程值从表层到深层逐渐减小,其最小值为 93.6 m。由图 2 也能明显得出变程的最小值大于采样间隔 30 m,表明采样数据能够用来进行空间结构分析。

块金值能够表征区域化变量随机性的大小,该值较大表示其随机性不能忽略。基台值表征随机性和结构性因素引起的空间变异总和。块金系数表征随机性因素引起的变异占总变异的比重,块金系数较大表明主要是由随机性因素导致了空间变异。 A_1 、 A_2 及 A_3 层的块金系数分别是 50.0%、50.0% 和 54.5%,表明土壤粉粘粒空间变异中占比较大的是随机因素。块金系数同样可以反映区域化变量空间相关性的大小,块金系数在 25%~75% 之间表示区域化变量空间相关性中等。

由表 2 可知,三个土层粉粘粒分布均为中等空间相关,说明结构性和随机性因素共同决定了土壤粉粘粒的空间分布。结构性因素使土壤粉粘粒空间相关性增强,相反随机性因素使得土壤粉粘粒空间相关性减弱,向一致化方向发展^[18]。 A_1 与 A_2 层的块金系数相等且都小于 A_3 层,说明 0~40 cm 深度土壤粉粘粒的空间相关性小于 40~60 cm,这是由于 0~40 cm 土层受水力侵蚀、耕作措施等人为活动的影响较大。

表 2 余姐河流域不同深度下土壤粉粘粒含量的地统计学参数
Tab.2 Geostatistics parameters of CS content at different soil depths in Yujiehe watershed

土层	块金值	基台值	块金系数/%	变程/m	模型	R^2	RSS
A_1	80.4	160.9	50.0	1 630.5	Exponential	0.823	308
A_2	71.2	142.5	50.0	209.1	Exponential	0.816	797
A_3	59.3	130.2	54.5	93.6	Exponential	0.708	863

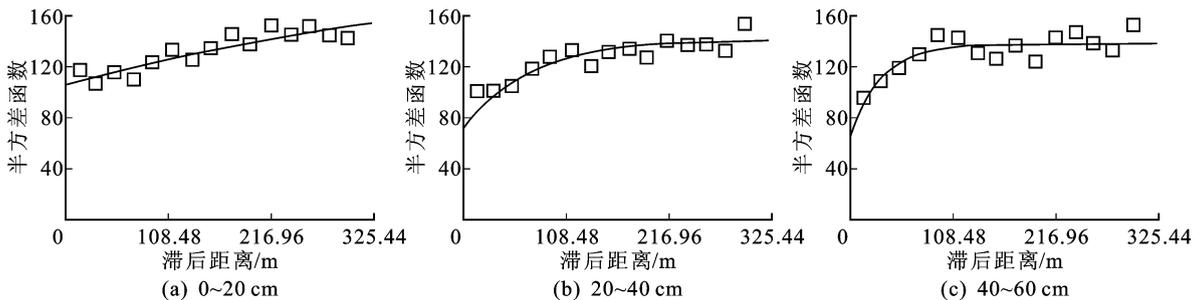


图 2 余姐河流域三个土壤深度下粉粘粒的半方差函数理论模型

Fig.2 Semivariogram theoretical model of the three soil depths of CS content

2.3 空间插值分析

为了能够比较直观的判断土壤粉粘粒的空间分布状况,对不同土层的粉粘粒数据进行了 Kriging

插值,并在 ArcGIS(10.1)中绘制了该地区不同深度土壤粉粘粒的空间分布图(见图 3)。由图 3 可以看出,三个土层粉粘粒含量的空间分布呈现整体带状、

局部块状的格局,并且随着深度的增加,粉粘粒含量也逐渐增加,其中 A_3 层的含量最高, A_2 层的空间分布范围最大。 A_1 层粉粘粒含量高的地方, A_2 层和 A_3 层也相对较高,呈现出较强的一致性,但 A_2 层和 A_3 层的分布范围更大。总体来说,土壤粉粘粒含量

相对较高的地方主要分布在林地、草地,而农地的含量最低。这是因为林地、草地的水力侵蚀较弱,而农地由于耕作侵蚀与水力侵蚀相对严重,造成大量粉粘粒的流失。

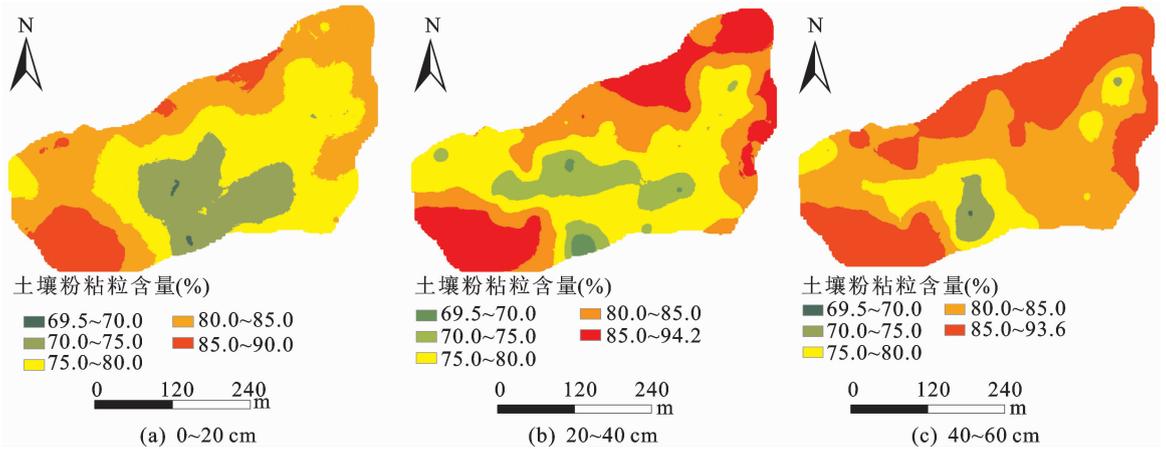


图3 余姐河流域三个土壤深度下粉粘粒含量空间插值结果

Fig. 3 Spatial interpolation distribution at the three depths of soil CS content in Yujiehe watershed

2.4 不同土地利用下粉粘粒含量及容重

余姐河流域不同土地利用下粉粘粒含量均值统计特征如表3所示。由表3能够得出, A_1 和 A_2 层粉粘粒含量的平均值表现为林地 > 草地 > 农地, A_3 层则为草地 > 林地 > 农地。不同土地利用下土壤容重

从 A_1 层至 A_3 层逐渐增大。经方差检验, A_1 和 A_2 层在农地、林地、草地三种土地利用方式下,粉粘粒含量不存在显著性差异 ($P > 0.05$), A_3 层则存在显著性差异 ($P < 0.05$)。另外, A_1 、 A_2 、 A_3 不同层之间的土壤粉粘粒含量存在极显著差异 ($P < 0.01$)。

表3 余姐河流域不同土地利用下粉粘粒含量均值统计特征

Tab. 3 Statistical characteristics of CS content with different land uses in the Yujiehe watershed

土层深度/ cm	林地		草地		农地	
	粉粘粒/%	容重/(g/cm ³)	粉粘粒/%	容重/(g/cm ³)	粉粘粒/%	容重/(g/cm ³)
0~20(A_1)	79.72	1.32	79.58	1.38	78.87	1.32
20~40(A_2)	81.32	1.54	81.17	1.55	79.76	1.55
40~60(A_3)	84.47	1.61	85.01	1.61	82.14	1.60

不同土地利用下 A_1 和 A_2 层粉粘粒含量表现为林地 > 草地 > 耕地,这是因为林地的冠层可以拦截降雨并减小雨滴的击溅作用,其较厚的腐殖质层又可以有效的增加入渗,减少地表径流。和林地相比,草地在降低雨滴末速和增加入渗方面的作用较弱,所以林地粉粘粒流失要比草地少。而耕地因为缺少植被保护和经常翻耕导致流失量最大。 A_3 层表现为草地 > 林地 > 耕地,这可能因为不同植被根系的作用使土壤颗粒组成产生了差异^[19]。由于研究区处于湿润地区,草地在 A_3 层已没有根系存在,而林地存在大量的根系,根系的分泌物会使土壤中的粉

粒和粘粒胶结,从而使 A_3 层粉粘粒含量表现为草地大于林地。

2.5 土壤粉粘粒储量估算

余姐河流域不同土地利用下各土层的土壤粉粘粒含量如表4所示。

由表4可知,不同土地利用类型下土壤粉粘粒密度分别为 718.45 kg/m²、732.02 kg/m² 和 745.17 kg/m²,表现为草地 > 林地 > 农地,变异系数表现为农地 > 草地 > 林地。这是因为农地经常受到人类农业耕作的影响,且农地的立地条件差异要比林地、草地大很多。

表4 余姐河流域不同土地利用下各土层的土壤粉粘粒含量
Tab.4 Storage of CS content within all soil layers under different land uses in the Yujiehe Watershed

土层深度/ cm	农地		林地		草地	
	平均值/(kg/m ²)	变异系数/%	平均值/(kg/m ²)	变异系数/%	平均值/(kg/m ²)	变异系数/%
0~20	208.04	6.3	209.91	5.4	219.64	5.4
20~40	249.77	6.9	250.48	6.1	251.96	6.1
40~60	263.64	5.9	271.63	4.4	273.57	5.1
0~60	718.45	6.0	732.02	4.8	745.17	5.0

在 ArcGIS(10.1)中,将余姐河流域按照 1m 的网格划分为 570 行×414 列。由公式 2 和 3 计算得余姐河流域 0~60 cm 土壤粉粘粒储量为 10.21 万 t,其中农地、林地、草地的粉粘粒储量分别为 3.44 万 t、3.23 万 t 和 3.54 万 t,表现为草地>农地>林地。农地面积最大而储量最小,说明农地粉粘粒流失最严重。这是因为在水土流失过程中,农田容易遭受径流冲刷^[20-21],而林地、草地具有良好的水土保持作用^[22-23],良好的土壤结构和广泛分布的根系在一定程度上保护了土壤颗粒免受土壤侵蚀,从而造成林地、草地立地条件下粉粘粒储量大于农地。

3 结 论

1) 研究区土壤粉粘粒含量表现为 $A_1 < A_2 < A_3$,其平均值分别为 79.15%、80.70% 和 82.98%。且 A_1 、 A_2 和 A_3 层的变异系数分别为 13%、14% 和 14%,均属中等变异。

2) 研究区三个土层的粉粘粒最优半方差模型均为指数模型,空间分布也都表现为中等空间相关。三个土层粉粘粒含量的空间分布呈现为整体带状、局部块状的格局,并且随着深度的增加,粉粘粒含量也逐渐增加。

3) 土地利用类型对 0~40 cm 土壤粉粘粒含量没有显著影响,在农地、林地、草地三种土地利用类型下,只有 A_3 层存在显著性差异 ($P < 0.05$)。另外, A_1 、 A_2 与 A_3 不同层间的粉粘粒含量存在极显著差异 ($P < 0.01$)。

4) 余姐河流域 0~60 cm 土壤粉粘粒储量为 10.21 万 t,其中农地、林地、草地的粉粘粒储量分别为 3.44 万 t、3.23 万 t 和 3.54 万 t,表现为草地>农地>林地。不同土地利用类型下土壤粉粘粒密度表现为草地>林地>农地。

参考文献:

[1] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等. 不同地貌类型及土地利用方式下土壤粒径的分形特征[J]. 西北农林科技大学

学报(自然科学版),2009,37(9):155-161.

SONG Xiaoyu, LI Yajuan, LI Huaiyou, et al. Fractal characteristics of soil particle-size distributions under different landform and land-use types[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2009, 37(9): 155-161.

[2] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析—以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报,2007,27(7):3081-3087.

WANG De, FU Bojie, CHEN Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types; a case study in the loess hilly areas of the loess plateau, china[J]. Journal of Ecology, 2007, 27(7): 3081-3087.

[3] 齐雁冰,常庆瑞,惠泱河. 人工植被恢复荒漠化逆转过程中土壤颗粒分形特征[J]. 土壤学报,2007,44(3):566-570.

QI Yanbing, CHANG Qingrui, HUI Yanghe. Fractal features of soil particles in desertification reversing process by artificial vegetation [J]. Journal of Soil, 2007, 44(3): 566-570.

[4] MARTÍNEZ-CASASNOVAS J A, SÁNCHEZ-BOSCH I. Impact assessment of changes in land use/conservation practices on soil erosion in the Penedès-Anoia vineyard region (NE Spain) [J]. Soil & Tillage Research, 2000, 57(1-2): 101-106.

[5] BASIC F, KISIC I, MESIC M, et al. Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 78(2):197-206.

[6] 黄丽,张光远,丁树文. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1995,5(1):35-39. HUANG Li, ZHANG Guangyuan, DING Shuwen. Study on soil particle losses of eroded purple field[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation,1995,5(1):35-39.

[7] 廖晓勇,陈治谏,刘邵权,等. 三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J]. 水土保持研究,2005,12(1):159-161.

LIAO Xiaoyong, CHEN Zhijian, LIU Shaoquan, et al.

- Study on soil losses in different land use types of purple slope cropland in the three gorges reservoir area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 159-161.
- [8] 李光录,姚军,庞小明. 黄土丘陵区土壤和泥沙不同粒径有机碳分布及其侵蚀过程[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 740-744.
- LI Guanglu, YAO Jun, PANG Xiaoming. Distribution and erosion process of organic carbon in the different particle size fractions in loess hills region[J]. *Journal of Soil*, 2008, 45(4): 740-744.
- [9] 张兴昌,邵明安. 侵蚀泥沙、有机质和全氮富集规律研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 541-544.
- ZHANG Xingchang, SHAO Mingan. Enrichment of organic matter and nitrogen in eroded bedloads[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(4): 541-544.
- [10] 王政权,王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 945-950.
- WANG Zhengquan, WANG Qingcheng. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests[J]. *Journal of Ecology*, 2000, 20(6): 945-950.
- [11] 杨媛媛,李占斌,宋晓强,等. 丹江水源区小流域土壤有效铁空间分布特征[J]. *西安理工大学学报*, 2015, 3(12): 201-206.
- YANG Yuanyuan, LI Zhanbin, SONG Xiaoqiang, et al. Spatial distribution of soil available iron in a small watershed of the Danjiang River water resource district [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(2): 201-206.
- [12] 黄萍萍,李占斌,徐国策,等. 基于田块尺度的丹江上游坡改梯土壤养分空间变异性研究[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(3): 307-312.
- HUANG Pingping, LI Zhanbin, XU Guoce, et al. Research on spatial heterogeneity of soil nutrient on slope cropland and terraced field scales in the upper reaches of the Danjiang River[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(3): 307-312.
- [13] 龚元石,廖超子,李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征[J]. *土壤学报*, 1998, 35(1): 10-15.
- GONG Yuanshi, LIAO Chaozi, LI Baoguo. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density[J]. *Journal of Soil*, 1998, 35(1): 10-15.
- [14] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤颗粒及分形特征[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 28-35.
- XU Guoce, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Soil particles and features in a typical watershed of the middle reach of Danjiang River[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 28-35.
- [15] NIELSEN D R, BOUMA J. Soil spatial variability [M]. Wageningen: PUDOC, 1985.
- [16] MEDOWELL L L. Plant nutrient yields in runoff from a Mississippi delta watershed[J]. *Trans. ASAE*, 1984, 27(4): 1059-1066.
- [17] CERDA A. Soil erosion after land abandonment in a semiarid environment of southern Spain [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1997, 11(2): 163-176.
- [18] 徐国策,李占斌,李鹏,等. 丹江中游典型小流域土壤总氮的空间分布[J]. *地理学报*, 2012, 67(11): 1547-1555.
- XU Guoce, LI Zhanbin, LI Peng, et al. Spatial distribution of soil total nitrogen in a typical watershed of the middle Danjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1547-1555.
- [19] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 187-199.
- ZOU Wenxiu, HAN Xiaozeng, LU Xinchun, et al. Effect of land use types on physical properties of blank soil profiles [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 187-199.
- [20] SCHIETTECATTE W, D'HONDT L, CORNELIS W M, et al. Influence of landuse on soil erosion risk in the Cuyaguatete watershed (Cuba) [J]. *Catena*, 2008, 74(1): 1-12.
- [21] ZHANG Xiaoming, CAO Wenhong, GUO Qingchao, et al. Effects of landuse change on surface runoff and sediment yield at different watershed scales on the Loess Plateau[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2010, 25(3): 283-293.
- [22] 陈磊,李占斌,李鹏,等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(增刊1): 170-176.
- CHEN Lei, LI Zhanbin, LI Peng, et al. The coupling effect on soil erosion and nutrient lost under a simulated rainfall[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(S1): 170-176.
- [23] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等. 南方红壤区不同利用土地产生流沙特征试验研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 239-243.
- WANG Bangwen, XIAO Shengsheng, ZHANG Guanghui, et al. Study on runoff and sediment yield characteristics under different land uses in red soil area of southern China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 239-243.