丹江典型小流域土壤有效铜分布规律

姚京威[1], 李占斌[1,2], 徐国策[1], 张铁钢[1], 刘晓君[2], 杨媛媛[1]

(1. 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; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘　要: [目的] 研究丹江中游典型小流域土壤有效铜在不同土层深度、土地利用类型以及地形地貌因子下的分布规律,以期为该流域土地管理提供科学依据。[方法] 应用地统计学和空间分析的方法对流域野外采样数据进行分析。[结果] (1) 取样区土壤有效铜均值为 0.743 mg/kg,土壤有效铜含量随土层深度的增加而降低; (2) 不同土地利用类型下土壤有效铜含量在 0.289～2.043 mg/kg 之间且土壤有效铜含量总体处于较低范围; (3) 不同土壤深度下土壤有效铜含量均与海拔呈负相关,而与坡度无相关性。[结论] 结构性因素导致土壤有效铜分布呈现出强的空间依赖性;而施肥状况、耕作措施、种植制度等各类人为活动的影响又使得随机性因素增加,最终使得研究区域内土壤有效铜含量总体上呈带状分布格局。

关键词: 土壤有效铜; 土地利用; 地形地貌; 小流域; 丹江

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2016)02-0239-05　　**中图分类号**: S157.2

文献参数: 姚京威, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江典型小流域土壤有效铜分布规律[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 239-243. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.045

Distribution of Soil Available Copper in Small Typical Watershed of Danjiang River

YAO Jingwei[1], LI Zhanbin[1,2], XU Guoce[1], ZHANG Tiegang[1], LIU Xiaojun[2], YANG Yuanyuan[1]

(1. *State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area; Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*; 2. *Institite of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] Distribution characteristics of soil available copper under different depths, land use patterns and topography factors at Danjiang River basin were studied for watershed land management. [Methods] Spatial analysis method of geostatistics was used to analyze the basin field data. [Results] (1) The mean value of soil available copper content was 0.743 mg/kg and decreased with the soil depth in whole research area. (2) The value of soil available copper content was comparatively in an overall low level, ranged from 0.289～2.043 mg/kg for all land use patterns. (3) Soil available copper content had negative correlation with elevation, no obvious correlation was found with slope gradient. [Conclusion] It is structural factors that led to the strong spatial dependence of soil available copper, and human activity, like fertilization, cultivation and planting, etc, was the stochastic factor. Both of them make the soil available copper content distributed in a zonal pattern.

Keywords: soil available copper; land use; landform; small watershed; Danjiang River

铜在植物的体内含量甚微,但却对植物的生理代谢活动有着非常重要的作用。铜不但是植物生长必需的营养元素之一,还参与多种酶的组成。如果土壤中的铜含量没有处在一个合理的阈值范围内,植物的生长发育就会因铜的丰缺而受到阻碍,甚至导致植物的遗传特性发生突变[1]。铜还是植物参与作物光合作用的必要元素,植物通过吸收 Cu^{2+} 和 Cu^{+},可以促进体内的蛋白质和碳水化合物的代谢与合成,使自身

收稿日期: 2015-03-24　　**修回日期**: 2015-06-18

资助项目: 国家自然科学基金项目"土石山区坡面水沙调控对土壤氮素迁移的作用机制研究"(41401316),"黄土区退耕生态系统植被根系行为特征与土壤水资源响应"(41271290); 中国博士后科学基金项目(2014M562440); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(15JS065)

第一作者: 姚京威(1987—),男(汉族),河南省周口市人,硕士研究生,研究方向为水土保持及荒漠化防治。E-mail: solofromchina@163.com。

通信作者: 徐国策(1985—),男(汉族),河南省洛阳市人,博士,讲师,主要从事水土流失与非点源污染模拟与调控方面的研究。E-mail: xuguoce_x@163.com。

抗逆性得到增强。而不适宜的铜浓度则会破坏植物内部生境,最终威胁到农作物的产量以及耕地的可持续利用。当前有效铜的研究中,针对不同土壤类型下有效铜含量及其空间分布特征的研究较为普遍,通常采取典型样地调查,结合GIS软件,运用空间自相关性理论和半方差函数模型进行分析。已有的研究[2]成果表明,有效铜具有较强的空间自相关性,其空间变异性与土壤的结构、类型、质地以及所处海拔相关,且受到人类耕作、施肥等随机性因素的共同作用[3-4]。土壤有效铜含量与土壤有机质含量表现出正相关关系,而与海拔呈负相关关系[5-6]。有效铜含量会受土层质地结构以及淋溶作用表现出一定的表面聚集或沉淀堆积特征[7-8]。有效铜含量总体上呈斑块状分布,区域差异性较为明显[9]。通过查阅相关文献,发现陕西省有效铜的研究区域多集中于陕北黄土高原地区,针对陕南地区尤其是丹江流域的较少,且大部分采样为典型样地采样,而较少采用能有效反映某一区域总体物质分布特征的网格法采样。鉴于此,本研究以陕西省商洛市商南县丹江鹦鹉沟小流域为对象,通过网格法和分层采样,运用地统计学以及空间分析方法,以地形地貌和土地利用类型为侧重点,系统比较不同土层深度、坡度、坡向、海拔以及土地利用方式下土壤有效铜的分布情况和累积特征,对其分布特征形成的原因进行合理化分析,最终明确该流域内土壤有效铜的分布状况,同时为流域内的农业生产和土地利用管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区域为鹦鹉沟小流域,位于陕西省商洛市商南县城东南2 km处的城关镇五里铺村(110°52′16″—110°55′30″E,33°29′55″—33°33′50″N)。鹦鹉沟小流域总面积为1.86 km^2,大部分以低山丘陵地貌为主,海拔在400～800 m之间。该流域位于北亚热带和暖温带过渡区,因此日照充足、气候温和、雨量充沛、四季分明。降水量在年内分配不均,且多以暴雨形式出现,年平均降水量803.2 mm,其中7—9月的降水量占全年降水量的50%左右[10]。流域内土壤主要以黄棕壤以及风化沙壤土为主。农地、林地和草地为该流域主要土地利用类型。农作物以小麦、花生和玉米为主[11]。

2 数据来源和分析方法

2.1 土壤样品采集与测定

在对研究区进行实地勘察的基础上,结合研究区内的实际地形、土地利用方式,于2013年12月在研究区域以100 m×100 m网格进行土壤样品采集,采样点以GPS定位,共采样190个点(图1),分布于全流域。土壤样品的坡度范围为0°～45°,坡向分为阳坡、阴坡以及无坡向,海拔从480—800 m,采样深度为40 cm。按0—10 cm,10—20 cm和20—40 cm这3个深度分别采集各土层的土壤样品,每层约1.0 kg。将自然状态下风干后的土壤进行研磨,经过筛孔孔径为0.15 mm的土壤筛筛选后装入纸袋中备用。

称取25.0 g风干土样放入180 ml塑料瓶中,加入50.00 ml的DTPA浸提液,在25 ℃时用震荡机震荡2 h,经过滤后得到浸出液。然后用北京普析公司生产的TAS-990 G型原子吸收分光光度计进行测定土壤有效铜含量。TAS-990 G型原子吸收分光光度计的特征量为4.0×10^{-13} g,检出限为5.0×10^{-13} g,精密度≤3%。

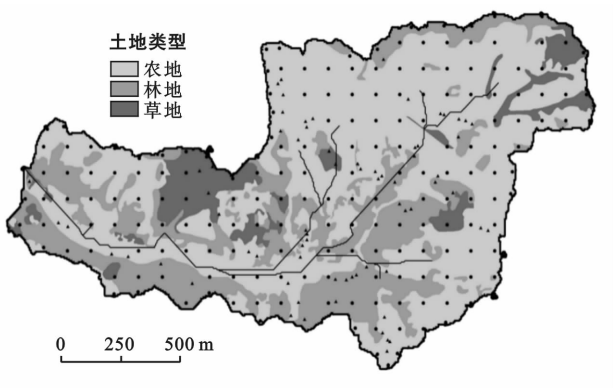


图1 研究区土地利用及采样点分布

2.2 数据分析与处理方法

采用SPSS 16.0软件对样本进行描述性分析,利用K-S检验数据是否符合正态分布,统计特征值包括平均值、最大值、最小值、变异系数等。采用GS$^+$ 7.0计算半方差函数,采用ArcGIS 9.3制作空间分布图。

3 结果与分析

3.1 不同土层深度下土壤有效铜含量的分布特征

根据不同土层深度下土壤有效铜含量的统计特征(表1)可以看出,土壤剖面有效铜的含量整体表现为:0—10 cm>10—20 cm>20—40 cm,即随着土壤深度的增加,土壤有效铜的含量逐渐减少,其中10—20 cm和20—40 cm层有效铜变化不大。土壤有效铜含量最大值发生在10—20 cm范围内,而最小值出现在20—40 cm土壤层内。由表1可知,取样区土壤有效铜均值为0.743 mg/kg,高于陕西省土壤有效铜

缺乏的临界值 0.5 mg/kg[12],但低于陕西省有效铜平均值 0.966 mg/kg 和商洛地区有效铜平均值 1.167 mg/kg[13]。土壤有效铜含量在土壤垂直方向上呈递减规律,这主要与动植物残体、根系在土壤中的分布有关。因为动植物残体大部分存在于土壤表面,并随深度增加而逐渐减少,土壤表层动植物残体的存在提高了有机质的含量,有机质被微生物分解释放出 Cu^{2+}。加之随着植物根系的不断生长,根系数量不断增多,吸收利用深层土壤中有效铜的能力也逐渐增强,故土壤有效铜含量随着土层深度的增加逐渐降低。不同土壤深度上有效铜的变异系数分别为 77%,59%和 84%。据 Biggar 和 Nielson[14] 的分类系统,3 个土壤深度下有效铜的变异均为中等变异,这主要是由于土壤受多种环境因素共同影响所造成的。20—40 cm 变异系数最大,根据分析可能因为该层处于淋溶层,在不同的立地条件和灌溉措施下,上层土壤中的有效铜向下层迁移,导致该层有效铜的累积程度不同。另外 20—40 cm 基本处于犁耕底层,受人为扰动较小,所以变异系数最小。

表 1　不同土壤深度有效铜含量的统计特征

土壤深度/cm	有效铜含量			
	平均值/(mg·kg^{-1})	最小值/(mg·kg^{-1})	最大值/(mg·kg^{-1})	变异系数/%
0—10	0.792	0.140	3.648	77
10—20	0.722	0.084	2.864	59
20—40	0.718	0.056	2.634	84
流域平均值	0.743	0.056	3.648	73

3.2　不同土地利用类型下土壤有效铜含量分布特征

根据不同土地利用类型下土壤有效铜统计特征分析表明(表 2),3 种土地利用方式下土壤有效铜含量均值分别为 0.741,0.822,0.748 mg/kg,均高于有效铜缺乏的临界值 0.5 mg/kg。但不同土地利用类型下土壤有效铜含量在 0.289～2.043 mg/kg 之间,且农地、林地、草地的土壤有效铜含量低于铜缺乏的临界值 0.5 mg/kg 的样本数占各自总样本数的 27%,19%和 21%,土壤有效铜含量总体处于较低范围。

表 2　研究区不同土地利用下有效铜含量统计特征

土地类型	有效铜含量			
	平均值/(mg·kg^{-1})	最小值/(mg·kg^{-1})	最大值/(mg·kg^{-1})	变异系数/%
农地	0.741	0.289	2.043	72
林地	0.822	0.331	1.841	55
草地	0.748	0.313	1.734	56

对比表 2—3,3 种土地利用方式下土壤有效铜含量排序为:林地＞草地＞农地,有机质含量除 A_3 层外均表现为:草地＞林地＞农地的特征。林地和草地有效铜含量较高,其原因很可能是由于林、草地植物根系较发达,大量的根系分泌物和根系腐烂后形成的腐殖质增加了土壤中有机质的含量,而有机质的提高又增强了土壤中微量元素的有效性[15],使得土壤有效铜含量较高;农地则因人类频繁的农事活动,土壤中的有效铜不断流失,加之本区域长期进行小麦和玉米轮作,加剧了土壤中有效铜的耗竭[5]。

3 种不同土地利用下有效铜含量范围分别为:农地 0.289～2.043 mg/kg;林地 0.331～1.841 mg/kg;草地 0.313～1.734 mg/kg。从最大值和最小值的差值可以看出,农地＞林地＞草地,农地的极差最大达到 1.754 g,这是由于频繁的农业生产活动等一系列人为因素的影响,干扰了土壤有效铜的平均分布。林地多分布在高海拔地区,地形变化较大,在水土流失作用下,大量黏、粉、砂粒向低海拔处迁移流失,随之造成不同位置土壤有效铜的含量差异增大。相比较而言,草地受人为扰动较小,地势起伏变化不大,于是呈现较小的含量差异。

3 种不同土地利用方式下有效铜的变异系数为 72%,55%和 56%,均属于中等变异,说明在不同的立地条件下有效铜的分布离散程度都较大。

表 3　不同土壤深度下有机质含量　g/kg

土地类型	有机质含量			
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	平均值
农地	9.31	7.15	6.75	7.74
林地	10.41	8.18	7.32	8.64
草地	12.57	11.46	6.60	10.21

3.3　土壤有效铜含量与地形因子的相关关系

3.3.1　不同土壤深度下有效铜与地形因子相关关系

坡度、坡向和海拔对土壤有效铜的含量均有不同程度的影响,因此在研究区分析了以上 3 种地形因子与土壤有效铜的相关关系(表 4)。从不同土壤深度下土壤有效铜与地形因子相关系数可以看出 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm 层均与海拔呈负相关,且 0—10 cm,20—40 cm 层呈现极显著相关,相关系数分别为 -0.333($p<0.01$)和 -0.263($p<0.01$);仅 0—10 cm 层与坡向呈现出显著负相关,相关系数为 -0.185($p<0.05$);3 层均与坡度没有表现出相关性。原因可能是随海拔升高气温降低,动植物的代谢和微生物的活动受到影响,同时单位面积内动植物的

生物量也发生变化，最终导致土壤有机质含量的变化，进而影响到土壤有效铜的含量[16]，而人类对土地的开垦、种植模式消弱了坡度和坡向的影响[17]。

表4 研究区不同土壤深度下土壤有效铜与地形因子相关系数

土壤深度/cm	相关系数		
	0—10	10—20	20—40
坡度/(°)	−0.037	−0.142	−0.152
坡 向	−0.185*	−0.149	−0.153
海拔/m	−0.333**	−0.123*	−0.263**

注：* 表示显著相关；$p<0.05$；** 表示极显著相关，$p<0.01$。

3.3.2 不同土地利用有效铜与地形因子相关关系 为了更全面分析有效铜在研究区域的空间相关性，进一步分析了不同土地利用下土壤有效铜含量与地形因子的关系。根据不同土地利用下土壤有效铜与地形因子相关性分析（表5）可以看出，仅农地与坡度、坡向和海拔都呈现出显著的相关性，说明农地受地形因子的影响较大。林地仅与海拔呈现出显著相关性，而草地则整体受地形因子的影响较小。农地与坡度表现出极显著地负相关关系，相关系数为−0.438（$p<0.01$），农地与海拔表现出显著地负相关关系，相关系数为−0.387（$p<0.05$），说明随着坡度增加、海拔升高，土壤有效铜含量减少。林地之所以与海拔呈现出显著相关性，是因为林地更多的受到山地植被垂直地带性分布规律的影响，不同海拔地区林木的种类、数量和生物量差别较大，进而影响到土壤有效铜的含量。

表5 研究区不同土地利用下土壤有效铜与地形因子相关关系

土地类型	相关系数		
	坡度	坡向	海拔
农地	−0.438**	−0.320*	−0.387*
林地	−0.078	−0.135	−0.522**
草地	−0.830	−0.333	0.951

注：* 表示显著相关，$p<0.05$；** 表示极显著相关，$p<0.01$。

根据研究区的实际地形，分别将坡度划分为5个等级，坡向划分为3个类型，海拔划分为4个高程等级。从不同土地利用类型在各地形因子下的土壤有效铜含量平均值表明（表6），农地土壤有效铜的平均含量明显受坡度、坡向和海拔的影响较大，且表现出一定的规律性。土壤有效铜的含量随坡度和海拔的增大而减小；而在坡度较缓（0°～3°）、海拔较低处（≤500 m）的农地土壤有效铜含量平均值明显大于其他坡度和海拔下的含量，这可能是由于本地区水土流失严重[18]，农地土壤有效铜的平均含量与坡向的相关关系表现为：无坡向＞阳坡＞阴坡，可能由于阳坡面更多的受到日光直射，随着一天中的日照强度和土壤温度的升高，土壤中的有机质加快分解速度，有效铜的含量随之增加。林地土壤有效铜的含量平均值随海拔的增加而减小，原因可能是受水土流失和植被覆盖度降低双重影响的结果；林地土壤有效铜含量随坡度和坡向未呈现出一定的规律性，这可能是因为林地多分布在立地条件较差且坡度大的地区，故坡度和坡向对其影响并不大。草地与坡度、坡向和海拔等地形因子的关系不密切，没有一定的规律性。总体来说，不同土地利用类型下土壤有效铜含量的平均值表现出的与地形因子的规律性和表5中的分析结果相一致。

表6 研究区不同土地利用类型在各地形因子下的土壤有效铜含量平均值 mg/km

地形因子		有效铜含量		
		农地	林地	草地
坡度/(°)	0～3	1.049	0.771	0.612
	3～8	0.685	0.529	0.522
	8～15	0.666	0.756	0.336
	15～25	0.573	0.691	0.827
	＞25	0.468	0.755	0.901
坡向	阴 坡	0.583	0.713	0.780
	阳 坡	0.660	0.780	0.647
	无坡向	0.885	0.692	1.004
海拔/m	≤500	1.208	0.971	0.612
	500～530	0.781	0.955	0.844
	530～560	0.751	0.753	0.702
	≥560	0.742	0.737	0.694

3.4 流域土壤有效铜空间分布特征

为了更直观地反映土壤有效铜的空间分布特征，对鹦鹉沟流域3个采样深度下土壤有效铜含量进行了Kriging插值。经检验，3个土壤分层下采样点数据进行Kriging插值的结果 p 值均小于0.05，不服从正态分布。所以，对采样点数据先进行log转化，再次经K-S检验，$p>0.05$，满足正态分布的要求。在GS+7.0里，利用半方差函数对不同土层深度下有效铜含量数据进行模拟。分析结果表明，0—10 cm，10—20 cm土层，有效铜的最优模型为球状模型，其决定系数分别为0.966，0.909；20—40 cm土层下，有效铜的最优模型为高斯模型，其决定系数为0.924。以上模型拟合精度都比较高，很好地反映研究区土壤有效铜的空间结构特征。根据拟合模型统计了样本系列的块金值、基台值、块金系数和变程等参数（表7）。由表7可知，3个土层下有效铜含量的变程随着土壤深度的增加而减小，变程最小值为1 035.77 m，

本次网格采样的间距 100 m,表明本次采样都在空间相关性的作用范围内,满足空间分析要求,可以进行内插或外推。表 6 中,3 个土层的有效铜含量块金系数均较低,且随着土层深度的增加而降低,分别为 17.64%,40.22%和 45.82%,说明表层土壤有效铜的空间分布特征表现出强烈的空间依赖性,较深层土壤有效铜的分布特征表现为中等空间依赖性。这可能是由于表层土壤有效铜分布主要受气候、地形、土壤质地结构以及植被覆盖类型等一系列自然条件因素的影响,这些结构性因素可以导致土壤养分分布呈现出强的空间依赖性;而施肥状况、耕作措施、种植制度等各类人为活动的影响又使得随机性因素增加,较深层土壤有效铜的空间相关性减弱,最终呈现出中等空间依赖性[19-20]。

表 7　鹦鹉沟流域不同深度下土壤有效铜的地统计学参数(lg)

深度/cm	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金系数/%	变程/m	拟合度	残差平方和 RSS
0—10	球状模型	0.019 9	0.112 8	17.64	1 654.00	0.966	3.204 E−04
10—20	球状模型	0.025 1	0.062 4	40.22	1 203.61	0.909	4.261 E−04
20—40	高斯模型	0.058 1	0.162 2	45.82	1 035.77	0.924	1.556 E−03

3.5　不同土层土壤有效铜插值分析

将不同土层的土壤有效铜含量进行插值分析,如图 2 所示研究区土壤有效铜的含量随土层渐深而总体呈现降低的趋势,土壤有效铜含量总体上自西向东呈带状分布格局,其高值区主要沿河道两旁地势相对平缓的地带分布,因此河道两旁应是农业非点源污染的重点预防控制和监测区域。由图 2 可以看出,越是处于河流下游,土壤有效铜含量就越高,这是因为鹦鹉沟小流域处于秦巴山区,土层较薄,山高坡陡,植被覆盖较差,加之降水年内分配不均,导致流域内暴雨集中、水土流失严重,土壤营养元素沿河流下游发生富集。

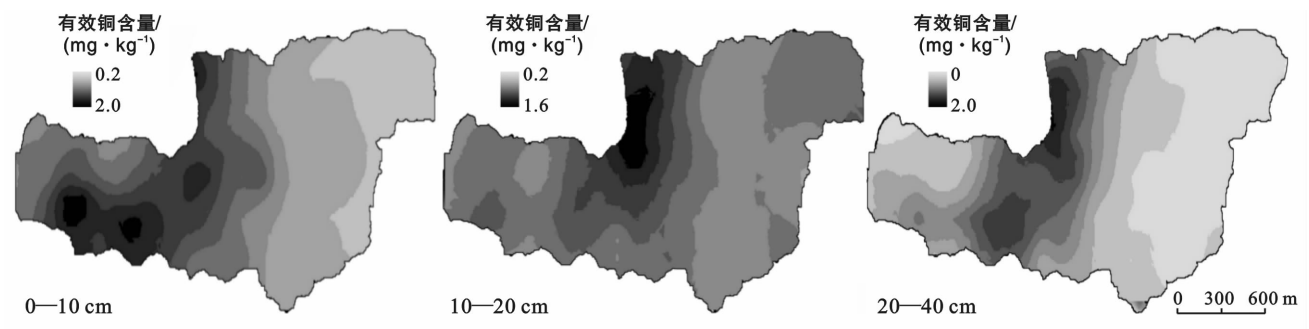


图 2　鹦鹉沟流域不同土层土壤有效铜含量的空间插值结果

4　结 论

(1) 研究区土壤有效铜平均含量为 0.743 mg/kg,并随土层深度的增加而降低。有效铜含量总体处于较低范围,且自西向东呈带状分布格局,其高值区主要沿河道两旁地势相对平缓的地带分布。

(2) 不同土壤深度下土壤有效铜含量均与海拔呈负相关,与坡度没有表现出相关性。不同土地利用下仅农地土壤有效铜的含量与坡度、坡向和海拔都呈现出显著的相关性,且随坡度和海拔的增大而减小;林地仅与海拔呈现出显著相关性,其有效铜含量随海拔的增加而减小;草地则整体受地形因子的影响较小。

(3) 人类频繁的农事活动和作物轮作,加剧了土壤中有效铜的耗竭。

[参 考 文 献]

[1] Nagalakshmi N, Prasad M N V. Copper-induced oxidative stress in Scenedesmus bijugatus: Protective role of free radical scavengers.[J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 1998, 61(5):623-8.

[2] 范文杰,张洪江,程金花,等.河北省吴桥县土壤微量元素空间分布特征[J].中国水土保持科学,2015,13(1):91-95.

[3] 刘思涵,许明祥,吴永斌,等.陇东黄土丘陵区梯田土壤养分评价:以甘肃庄浪县为例[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(9):149-156.

[4] 李社新,李占斌,张晓霞.陕北黄土高原小流域土壤有效铜分布特征[J].水土保持通报,2011,31(1):114-116.

[5] 吕静霞,王旭刚,付彭辉,等.豫西地区有效铜含量分布及其影响因素[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):155-160.

(下转第 249 页)

[4] 郭玲霞,封建民.农民对参与式水资源管理的认知响应[J].水土保持通报,2015,35(3):325-331.

[5] 马岩,陈利顶,虎陈霞.黄土高原地区退耕还林工程的农户响应与影响因素:以甘肃定西大牛流域为例[J].地理科学,2008,28(1):34-39.

[6] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.基于参与性调查的农户对退耕政策及生态环境的认识与响应[J].生态学报,2005,25(7):1741-1747.

[7] 翟文侠,黄贤金.农户水土保持行为机理:研究进展与分析框架[J].水土保持研究,2005,12(6):108-112.

[8] 马鹏红,黄贤金,于术桐,等.江西省上饶县农户水土保持投资行为机理与实证模型[J].长江流域资源与环境,2004,13(6):568-572.

[9] Qiu Jiali, Shen Zhenyao, Chen Lei, et al. The stakeholder preference for best management practices in the Three Gorges Reservoir region[J]. Environmental Management, 2014,54(5):1163-1174.

[10] Amsalu A, de Graaff J. Farmers' views of soil erosion problems and their conservation knowledge at Beressa watershed, central highlands of Ethiopia[J]. Agriculture and Human Values, 2006,23(1):99-108.

[11] Mbaga S Z, Folmer H. Household adoption behaviour of improved soil conservation: The case of the North Pare and West Usambara Mountains of Tanzania[J]. Land Use Policy, 2000,17(4):332-336.

[12] 翟文侠,黄贤金.应用 DEA 分析农户对退耕还林政策实施的响应[J].长江流域资源与环境,2005,14(2):198-203.

[13] Walters B B, Cadelina A, Cardano A, et al. Community history and rural development: Why some farmers participate more readily than others[J]. Agricultural Systems, 1999,59(2):193-214.

[14] 钟太洋,黄贤金.区域农地市场发育对农户水土保持行为的影响及其空间差异:基于生态脆弱区江西省兴国县、上饶县、余江县村域农户调查的分析[J].环境科学,2006,27(2):392-400.

[15] Willy D K, Holm M K. Social influence and collective action effects on farm level soil conservation effort in rural Kenya[J]. Ecological Economics, 2013,90(3):94-103.

[16] 吴昌广,林德生,肖文发,等.三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J].应用生态学报,2011,22(1):151-158.

[17] 韦杰,贺秀斌.三峡库区农村劳动力转移对水土保持的影响[J].中国水土保持,2010(10):18-20.

[18] 中华人民共和国环境保护部.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].中国环境监测总站,2014.

[19] 徐昔保,杨桂山,李恒鹏,等.三峡库区蓄水运行前后水土流失时空变化模拟及分析[J].湖泊科学,2011,23(3):429-434.

(上接第 243 页)

[6] 范玉兰,卢映琼,李峰,等.赣南脐橙园土壤有效铜含量分布特征研究[J].果树学报,2015(1):69-73.

[7] 李莲芳,曾希柏,白玲玉.不同农业利用方式下土壤铜和锌的累积[J].生态学报,2008,28(9):4372-4380.

[8] 于青漪,王翠红,甘丽仙,等.浏阳大围山土壤铜锌含量的剖面分布规律[J].农业现代化研究,2014(4):477-480.

[9] 黎娟,周清明,邓小华,等.湘西植烟土壤有效铜含量及分布规律研究[J].北京农学院学报,2013,28(1):4-7.

[10] 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.

[11] 龙菲菲,李占斌,徐国策,等.丹江典型小流域有机碳在土壤团聚体不同粒级的分布研究[J].水土保持学报,2014,21(6):149-152,190.

[12] 余存祖,彭琳,刘耀宏,等.黄土区土壤微量元素含量分布与微肥效应[J].土壤学报,1991(3):317-326.

[13] 郭兆元.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992:15-18,31.

[14] Biggar J W, Nielsen D R. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil[J]. Water Resources Research, 1976, 12(12):78-84.

[15] 张晓霞,李占斌,李鹏,等.黄土高原林地土壤微量元素分布和迁移特征[J].应用基础与工程科学学报,2011(S1):161-169.

[16] 王金牛.植物物候分化格局对维持高山草地植物氮素利用及其动态平衡的适应性贡献[D].北京:中国科学院大学,2013.

[17] 侯淑楠.土地开垦土壤障碍因子及改良模式研究[EB/OL].土壤养分速测仪.http://www.top17.net.2007.

[18] 张骅.论陕南水土保持方略[J].水利发展研究.2001,2(6),27-29.

[19] 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.

[20] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:46-57.