

黄维恒, 包立, 林健, 等. 泚江流域耕地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 456-465.

HUANG Wei-heng, BAO Li, LIN Jian, XIONG Hui-jing, et al. Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Arable Soils in Bijiang Watershed, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 456-465.

泚江流域耕地土壤重金属分布及生态风险评价

黄维恒^{1,2}, 包立^{1,2}, 林健², 熊荟菁^{1,2}, 邓洪^{1,2}, 张乃明^{2*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南昆明 650201)

摘要:地处兰坪铅锌矿下游的泚江流域土壤重金属污染问题倍受关注。本文在泚江流域采集了 35 个耕地土壤样品, 分析测定了砷、铜、锌、镉、铅、汞 6 种重金属污染物累积量, 并应用内梅罗综合污染指数法及 Hacanson 潜在生态风险指数法, 对耕地土壤污染状况及生态风险进行评价。结果表明: (1) 泚江流域沿岸耕地重金属铅、锌、镉累积量相对处于极高水平, 均值分别为 1 146.97、579.15、4.85 mg·kg⁻¹, 污染十分严重; 砷的累积量也较大, 均值为 26.85 mg·kg⁻¹; 铜、汞累积量较小, 污染程度轻; (2) 地统计分析结果表明, 兰坪周边流域是土壤重金属砷、锌、铅、镉污染的一个主要点源污染源, 而铜、汞污染没有显著点源污染源, 均来自不同面源污染; (3) 流域内梅罗指数均值为 17.69 (远大于 3), 存在极其严重重金属污染, 同时综合潜在生态风险指数均值为 773.38, 有很强潜在生态风险。污染物贡献表现为镉>铅>锌>砷>汞>铜; (4) 泚江流域耕地土壤总体表现为水田重金属污染略高于旱地。

关键词:生态风险; 重金属; 泚江流域; 耕地土壤

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)05-0456-10

doi: 10.13254/j.jare.2017.0113

Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Arable Soils in Bijiang Watershed, China

HUANG Wei-heng^{1,2}, BAO Li^{1,2}, LIN Jian², XIONG Hui-jing^{1,2}, DENG Hong^{1,2}, ZHANG Nai-ming^{2*}

(1. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Soil Fertility and Pollution Remediation Engineering Laboratory, Kunming 650201, China)

Abstract: It has been paid much attention to soil heavy metal pollution in the Bijiang watershed caused by the Lanping lead-zinc mine. We collected 35 arable soil samples along Bijiang, then sampled and tested the contents of As, Cu, Zn, Cd, Pb, Hg. And then with Nemerow Multi-Factor Index and the Potential Ecological Risk Index method, we evaluated the heavy metal pollution risk. The results showed: (1) The accumulation of Pb, Zn, Cd was in a relatively high level, the average was 1 146.97, 579.15, 4.85 mg·kg⁻¹ respectively, which was seriously polluted; the average accumulation of As was 26.85 mg·kg⁻¹; but Cu, Hg was slightly polluted. (2) Statistical analysis showed that Lanping area was a main point source pollution of As, Zn, Pb, Cd, while Cu, Hg was pollution caused by different non-point source pollution. (3) Within this basin, the Nemerow index was 17.69, which was serious heavy metal pollution, while the comprehensive potential ecological risk index was 773.38, which was a strong potential ecological risk. The contribution of pollutants was Cd>Pb>Zn>As>Hg>Cu. (4) As a whole, the soil heavy metal pollution of paddy field was higher than of the dry land.

Keywords: ecological risk; heavy metal; Bijiang watershed; arable soil

土壤重金属污染是一种严重的环境污染类型, 土壤中的重金属元素不能被微生物所降解, 且可通过食

物链在生物体内富集, 最终危害人体的健康^[1-4], 同时可能导致农作物减产或绝收^[4-6]。据 2014 年 4 月 17 日《环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报》^[7]显示, 全国土壤总的点位超标率为 16.1%, 无机污染物超标点位占全部超标点位的 82.8%, 从污染物超标情况看, 镉、汞、砷、铜、铅、锌等 6 种无机污染物点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、0.9%。2007 年, 赵其国院士^[8]的材料显示, 我国重金属污染农田土壤超过 2 000 万 hm²; 农业部进行

收稿日期: 2017-05-01

基金项目: 云南省科技惠民计划“泚江流域农田土壤重金属污染修复关键技术研究及应用”(2014RA018); 云南省科技创新人才计划(2015HC018); 对外科技合作计划-院士专家工作站(2015IC022)

作者简介: 黄维恒(1993—), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染、土壤环境污染监测与污染修复技术研究。

E-mail: 937583889@qq.com

* 通信作者: 张乃明 E-mail: zhangnaiming@sina.com

的全国污水灌溉区域调查统计显示,140万 hm^2 的污水灌区中,遭受重金属污染的土地面积占农田灌溉区面积的64.8%;宋伟等^[9]的研究表明,我国耕地土壤的重金属污染面积大概在16.67%左右,约占我国耕地总量的六分之一,且耕地中污染和重污染的比例分别为1.45%和0.72%,15.22%处在警戒边缘。耕地土壤重金属污染具有高毒性、潜伏性、难迁移、易累积等性质,所以评价其污染程度、摸清其风险指数对生态健康和生命安全都具有重大意义^[10]。

地处兰坪铅锌矿下游的沱江流域土壤重金属污染问题尤为明显,有研究表明^[11],铅锌矿区土壤污染常表现为以Pb、Zn、Cd、Cu、Hg和类金属元素As为主的多种重金属复合污染,其中尤以Pb、Cd、As的污染为重,受污染严重地域植被破坏,甚至寸草不生。且冶矿废渣中含有大量Cd、Pb、Zn等重金属,进入环境后因不能被环境中的微生物分解而易于在土壤中积累,并在农作物中残留,最终通过食物链,影响人体健康,并对整个生态系统构成极大的危害^[12]。

以往沱江流域重金属污染研究主要集中在沱江水体污染和矿区土壤污染^[13-18],以及对沱江流域耕地土壤重金属的污染评价,如周鸿斌等^[9]运用磁测分析发现沱江沿岸农田土壤单项污染指数 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$,且3种重金属污染与兰坪矿产开发有关;赵筱青等^[19]发现沱江流域土壤中Pb和Cd主要以水溶态为主,容易通过食物链富集危害人体健康,且随着兰坪矿区距离增加,重金属As、Pb、Zn、Cd含量降低。但总体来说,缺少对全流域重金属空间分布研究,针对沱江沿岸农田土壤重金属研究很少^[3-4]。本文通过对沱江沿岸耕地土壤采样,分析土壤样品中砷、铜、锌、镉、铅、汞6种重金属含量,进一步评价土壤重金属污染现状,分析探讨沱江沿岸农田土壤潜在生态风险,并首次于沱江流域运用地统计学分析方法分析,绘制出沱江流域耕地土壤重金属砷、铜、锌、镉、铅和汞的累积量插值图,直观分析各种重金属污染来源,对矿区周边地区重金属污染土壤的可持续利用和生态修复具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沱江位于滇西北“三江并流区”南部,25°28′~26°41′N,99°13′~99°36′E,是澜沧江-湄公河上游的重要支流,全长150 km,流域面积2 447.14 km^2 ,自雪盘山与清水朗山之间由北向南而下,由兰坪县经“金鸡桥”

流入云龙县境内,至“功果桥”汇入澜沧江,多年平均径流量11.4亿 m^3 ^[17,19-20],是流经兰坪、云龙两县的唯一大河。沱江上游兰坪金顶铅锌矿是我国目前已经探明的最大铅锌矿,探明铅、锌、镉储量分别达2.53、1.30、0.17 Mt,且集中在6.8 km^2 的矿区范围内,80%以上可以露天开采^[4,21],沿江水田居多,旱地较少,主要作物为水稻、玉米、小麦,部分水田有水稻、小麦轮作习惯,玉米大多套种白菜等十字花科作物。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 土壤样品采集

于2015年7月5日从沱江上游兰坪的金顶镇沿沱江至下游的功果桥,在江两岸有农田分布区域采集农田耕地土壤表层土(0~20 cm)35个土壤样品(图1),其中旱地12个,水田23个。并用GPS确定地理坐标。在各个采样点,依据文献^[22]混合采样。

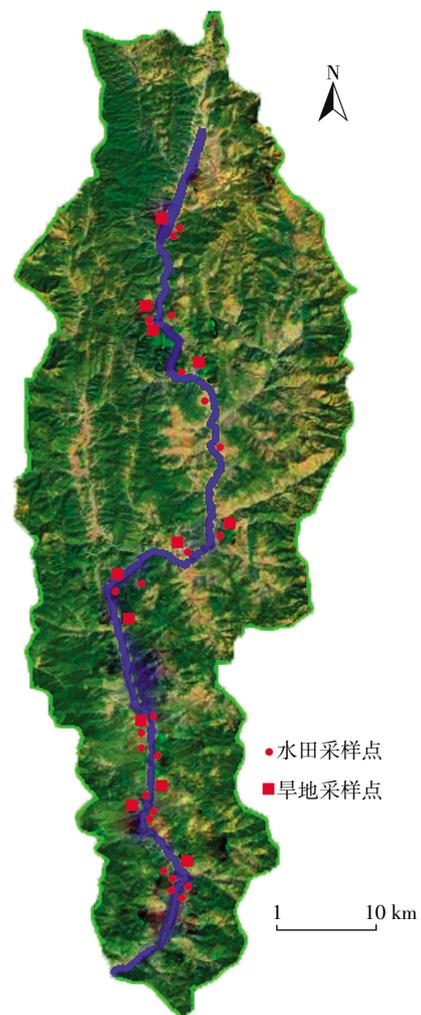


图1 沱江流域农田土壤采样点

Figure 1 Sampling points of farmland soil in Bijiang basin

1.2.2 样品处理与测试

根据文献[22],随机多点混合采样。土壤样品经自然风干,去除石砾、有机残体、植物根系等,过 1、0.149 mm 筛后分别用于测定 pH 值和砷、铜、锌、镉、铅、汞 6 种重金属含量。测定方法均采用中华人民共和国环境保护部发布的《土壤监测规范标准》(其中:铅、镉采用 GB/T 17141—1997;砷采用 GB/T 17135—1997;铜、锌采用 GB/T 17138—1997;汞采用 GB/T 17136—1997),测定时各个土壤样品均称取经风干过 0.149 mm 筛的均匀混合土 0.2 g,采用原子吸收分光光度计石墨炉法测定,精度为万分之一,6 种元素相对标准偏差小于 1%,Pb 检出限小于 5 μg·L⁻¹,As 检出限小于 0.05 μg·L⁻¹,Cd 和 Hg 检出限小于 0.001 μg·L⁻¹,Zn 检出限小于 1.0 μg·L⁻¹,Cu 检出限小于 3.0 μg·L⁻¹,每个数据均为至少 3 个平行样品的平均值。

1.2.3 图形制作与数据处理

所有数据均采用 Excel 2013 进行统计分析,图形制作采用 Arc GIS 10.2 及谷歌地图完成。地统计分析采用 GS+7.0 软件拟合半变异函数建立拟合模型及其参数;在 Arc GIS 10.2 中应用 Geostatistical Analyst 模块,并采用普通 Kriging 方法,输入地统计参数和重金属检测含量,建立沱江流域耕地土壤镉、砷、锌、铅、汞、铜 6 种重金属元素含量的空间分布图。

1.3 评价方法与标准

结合土壤 pH 值,参照国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[22]二级标准。采用内罗梅综合污染指数法及 Hacanson 潜在生态风险指数法进行土壤污染状况及生态风险评价。

1.3.1 内梅罗综合指数法^[23-24]

综合污染评价采用兼顾单元素污染指数平均值和最大值的内梅罗综合污染指数法^[25],计算公式如下:

$$P_{综} = \sqrt{[(P_{i\text{ave}})^2 + (P_{i\text{max}})^2] / 2} \quad (1)$$

式中: $P_{i\text{max}}$ 为土壤污染中单项污染指数最大值; $P_{i\text{ave}}$ 为土壤污染中单项污染指数的平均值;根据 $P_{综}$ 值的大小,可将土壤污染程度划分为 5 级(表 1)。

1.3.2 Hacanson 潜在生态风险指数^[26-29]。

Hacanson 潜在生态风险指数法,主要用于衡量土壤中重金属对环境存在的生态风险,是综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标,适合于对大区域范围的土壤进行评价比较,公式如下:

$$C_{ij} = \frac{C_{is}}{C_{in}} \quad (2)$$

$$E_{ir} = T_{ir} \cdot C_{ij} \quad (3)$$

表 1 内梅罗指数法分级标准

Table 1 Grade standard of Nemerow Index

等级	单因子污染指数	污染等级	综合污染指数	污染等级
1	$P_i < 1$	清洁	$P_{综} \leq 0.7$	安全
2	$1 \leq P_i < 2$	轻污染	$0.7 < P_{综} \leq 1$	警戒级
3	$2 \leq P_i < 3$	中污染	$1 < P_{综} \leq 2$	轻污染
4	$P_i \geq 3$	重污染	$2 < P_{综} \leq 3$	中污染
5			$P_{综} > 3$	重污染

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{ir} \quad (4)$$

式中: C_{ij} 为重金属的富集系数; C_{is} 为重金属 i 的实测含量; C_{in} 为计算所需的参比值。本文采用国家二级标准; E_{ir} 为土壤中第 i 种重金属元素的潜在生态危害系数; T_{ir} 为第 i 种重金属元素的毒性系数,反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度; RI 为综合潜在生态风险指数。

根据 Hacanson^[26]与徐争启等^[27]的研究,目前国内外常用的重金属毒性系数分别为:As=10,Cu=Pb=5,Zn=1,Hg=40,Cd=30。 RI 为土壤中多种重金属的综合生态危害指数。土壤中重金属浓度越大,重金属污染物种类越多,重金属的毒性水平越高,潜在生态风险指数值越大,表明其潜在生态风险越高。土壤潜在生态风险的分级标准见表 2。

表 2 土壤潜在生态风险分级

Table 2 Grade standard of E_{ir} and RI

风险程度	低	中等	强	很强	极强
E_{ir}	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	600~1 200	>1 200

2 结果与讨论

2.1 沱江流域耕地土壤重金属污染状况

为更好地表征污染物含量,采用平均值、范围值以及变异系数 3 个统计指标进行统计分析。全流域 35 个采样地点的 6 种主要重金属污染物含量测定结果见表 3。全流域耕地土壤铅、锌积累水平较高,流域均值分别为 1 146.97、579.15 mg·kg⁻¹,远远超过土壤环境质量国家二级标准限定值,其中铅含量最高达 4 306.70 mg·kg⁻¹,锌含量最高处也有 3 288.90 mg·kg⁻¹;砷、铜、镉、汞的含量均值分别为 26.85、11.24、4.85、0.19 mg·kg⁻¹,其中砷、铜、汞未超国家二级标准,而镉则远远超过国家二级标准限定值 0.3 mg·kg⁻¹。

比较不同耕作方式(主要分为水田和旱地)发现,

表3 泚江流域耕地土壤重金属含量统计

Table 3 Statistic values of heavy metal concentration of arable soil in Bijiang basin

类型	项目	As	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
全流域(n=35)	均值/mg·kg ⁻¹	26.85	11.24	579.15	4.85	1 146.97	0.19
	范围/mg·kg ⁻¹	3.72~91.50	1.00~29.00	50.30~3 288.90	0.05~26.83	0.20~4 306.70	0.02~0.52
	变异系数/%	64.20	67.09	121.47	107.29	94.18	67.04
水田(n=23)	均值/mg·kg ⁻¹	27.09	11.80	697.69	5.29	1 311.57	0.19
	范围/mg·kg ⁻¹	3.72~91.50	1.00~29.00	50.30~3 288.90	0.63~26.83	0.20~4 306.70	0.02~0.52
	变异系数/%	67.15	63.96	111.83	106.90	85.48	66.78
旱地(n=12)	均值/mg·kg ⁻¹	26.39	10.19	351.95	4.01	831.51	0.19
	范围/mg·kg ⁻¹	8.89~58.30	1.00~21.00	88.30~1 608.60	0.05~14.02	0.20~2 654.06	0.05~0.52
	变异系数/%	54.54	69.72	112.54	101.67	103.85	64.70

耕地土壤重金属砷、铜、锌、镉、铅积累量水田均值分别为 27.09、11.80、697.69、5.29、1 311.57 mg·kg⁻¹,旱地均值分别为 26.39、10.19、351.95、4.01、831.51 mg·kg⁻¹,均表现为水田积累量大于旱地。重金属汞在水田旱地积累量没有明显差距,水田旱地统计累计值均为 0.19 mg·kg⁻¹。

2.2 泚江流域耕地土壤重金属空间分布

重金属空间分布是由结构性和随机性因素共同作用的结果。地统计分析中块金值代表误差和小于试验取样尺度的一系列人为随机因素引起的变异块金值,一般用字母 C₀ 表示;偏基台值代表由气候、成土母质、地形地貌等一系列非人为区域因素引起的变异,一般由字母 C 表示。许多土壤性质的半方差函数在位置趋于零时并不为零,这时的非零值就称之为“块金方差”(Nugget variance)或“块金效应”。它代表了一系列无法解释的或者随机产生的变异,通常由测定误差或者土壤性质的微变所造成。块金效应可以用于表示土壤的相关性。其值由块金值和偏基台值计算而得:

$$\text{块金效应} = C_0 / (C + C_0)$$

由表 4 和表 5 可以看出,泚江流域沿岸耕地土壤重金属砷、锌、镉、铅的块金效应分别为 0.096 6、0.004 1、0.028、0.074 2,远远小于 0.25,具有很强空间相关性,

符合正态分布,受结构性因素(自然因素)影响较大。而重金属铜和汞的块金效应均大于 0.75,空间相关性较弱,不符合正态分布,受人为因素影响较大。有研究结果^[30-31]表明,如果不符合正态分布,就会出现比例效应,导致基台值升高、块金值增大,从而加大误差,改变结构,降低插值精度。所以,在 Arc GIS 地统计分析软件中必须对不符合正态分布的指标进行对数转换,使其符合正态分布或分布近似于正态分布,再进行克里金空间插值。所以在本次研究中,先对铜和汞含量的半方差函数值进行了对数转换后,再进行克里金(Kriging)空间差值。

图 2 表明,重金属砷具有明显的空间分布特征,全流域积累量最大、变化幅度较大区域为上游兰坪县及其周边地区,随着离兰坪县的距离增加其含量呈现出递减趋势,有明显的带状分布规律。中下游含量较低,变化幅度也不大,其含量分布没有明显规律。

图 3 表明,泚江流域土壤重金属铜分布呈现不规则

表5 块金效应与空间相关性

Table 5 Nugget effect and spatial correlation

块金效应	空间相关性
<0.25	强
0.25~0.75	中等
>0.75	弱

表4 泚江流域耕地土壤重金属地统计分析

Table 4 Geo-statistic analysis of farmland soil heavy metals in Bijiang basin

指标	As	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg
变换类型	Box-Cox	log	Box-Cox	Box-Cox	Box-Cox	log
趋势移除	无	局部多项式插值法	无	无	无	局部多项式插值法
块金值	366.37	51.05	1.20×10 ⁵	1.78	1.33×10 ⁶	0.11
偏基台值	3 425.51	6.00	29.49×10 ⁷	60.94	1.66×10 ⁷	0
块金效应	0.096 6	0.89	0.004 1	0.028	0.074 2	1

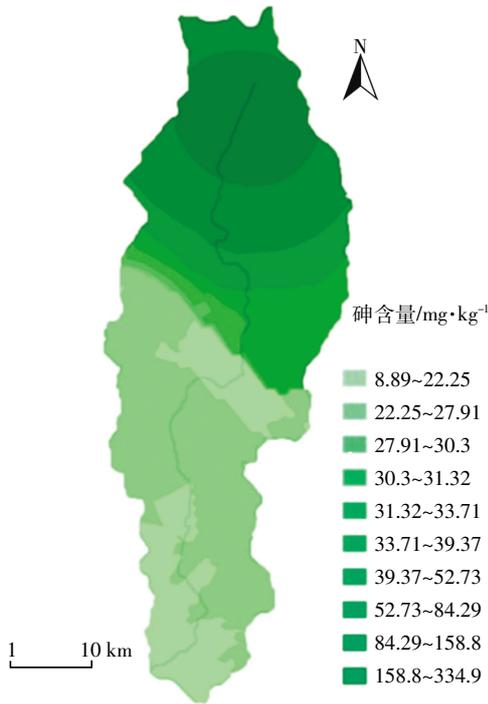


图 2 泚江流域土壤重金属砷空间分布

Figure 2 The As spatial distribution in Bijiang basin

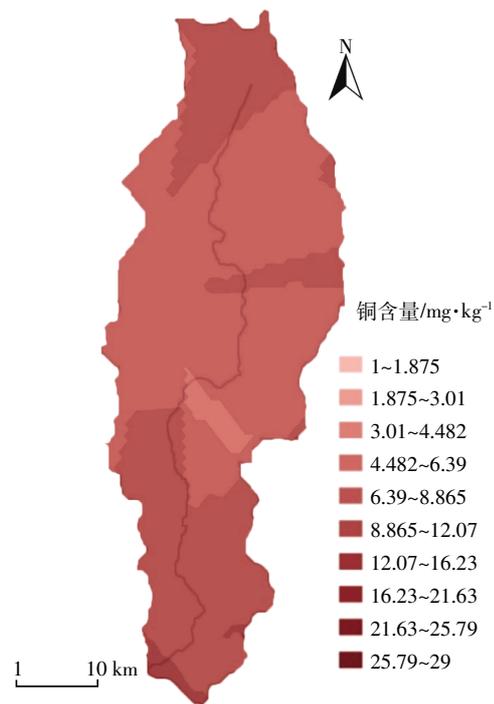


图 3 泚江流域土壤重金属铜空间分布

Figure 3 The Cu spatial distribution in Bijiang basin

则块状分布,没有集中较高的区域,流域中、上游大部分区域铜累积量较下游低,只有兰坪县周边含量较高,但沿江而下并没有出现累积量递增或递减规律。说明泚江流域土壤重金属铜的积累主要发生在人口密集区域,人类活动频繁地区累积量较大,含量较高。矿区的开采对泚江流域土壤重金属铜的积累贡献并不明显。

图 4 表明,重金属锌具有明显的空间分布特征,全流域累积量最大、变化幅度较大区域为上游兰坪县及其周边地区,随着离兰坪县的距离增加其含量呈现出递减趋势,有明显的带状分布规律。其中云龙县诺邓镇上游某一区域出现一个类似于兰坪县周边区域一样的点源污染源,并以此向外辐射递减。

图 5 表明,全流域铅累积量最大区域为上游兰坪县及其周边地区,并且有很强的空间分布规律,全流域铅的累积量以兰坪县为中心向下游辐射递减,越往下游含量越低,有明显带状分布规律。

图 6 表明,泚江流域土壤重金属汞的空间分布具有一定特征,流域上游兰坪县周边累积量最低,沿江其余地区含量较均一,而在云龙县上游和云龙县下游含量较高,说明泚江流域土壤重金属汞的积累主要发生在人口密集区域,人类活动频繁地区累积量较大,含量较高。矿区的开采对泚江流域土壤重金属汞的积

累贡献并不明显。

图 7 表明,泚江流域土壤重金属镉有明显空间分布特征,累积量最大区域为兰坪县及其周边区域,随着江水而下镉的累积量向远离上游区域呈现辐射递减趋势,有明显带状分布规律,流域中上游区域有明显的阶梯状分布规律,下游地区累积量相对平稳,变化不大。

综合泚江流域耕地土壤重金属砷、铜、锌、镉、铅、汞的地统计分析,流域内砷、锌、镉和铅空间带状分布规律明显,最高区域均集中于兰坪县及其附近,下游区域呈现累积量递减趋势,说明兰坪县是泚江流域耕地土壤重金属砷、锌、镉、铅污染的主要非面源污染源,这与兰坪县铅锌矿区活动密切相关。而铜和汞没有明显点源污染源,主要来自不同区域不同程度的面源污染。

2.3 泚江流域耕地土壤重金属污染评价

单因子污染指数最大值、最小值的评价是为了确定泚江流域内耕地土壤的极限污染状况,并确定最大污染点和最小污染点,为科学评价全流域综合污染状况提供依据。以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中二级标准作为评价标准,采用单项污染指数法进行评价,结果显示(表 6):在 35 个采样点中,砷超标 13 个、铜超标 0 个、锌超标 17 个、镉超标 33 个、

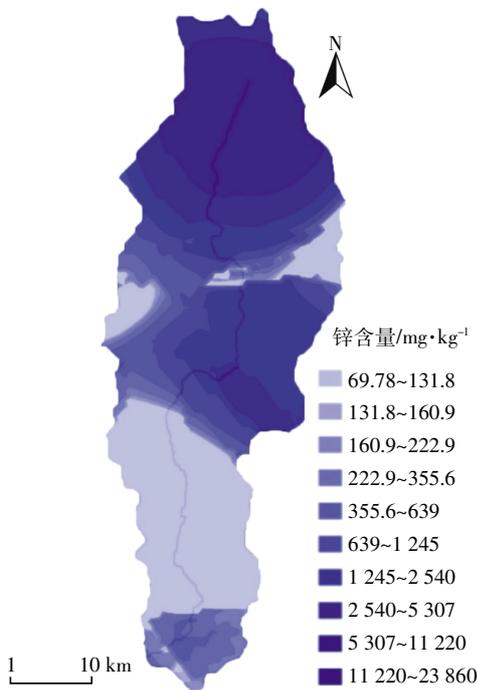


图4 沘江流域土壤重金属锌空间分布
Figure 4 The Zn spatial distribution in Bijiang basin

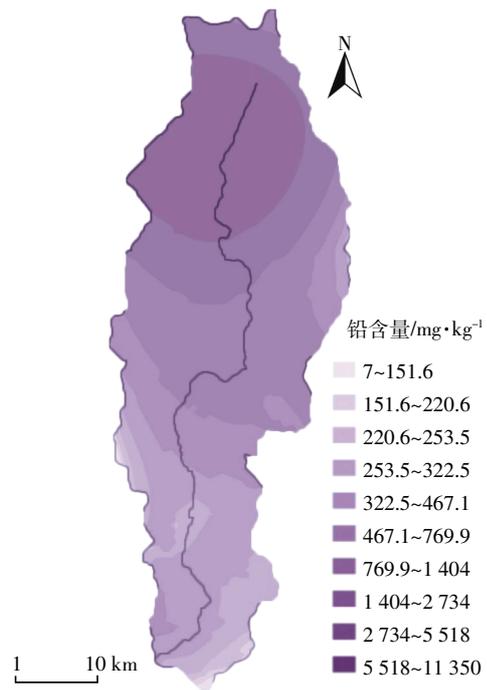


图5 沘江流域土壤重金属铅空间分布
Figure 5 The Pb spatial distribution in Bijiang basin

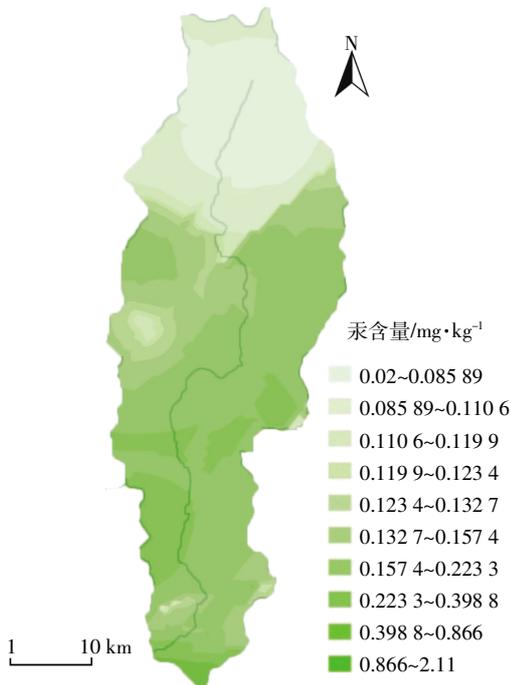


图6 沘江流域土壤重金属汞空间分布
Figure 6 The Hg spatial distribution in Bijiang basin

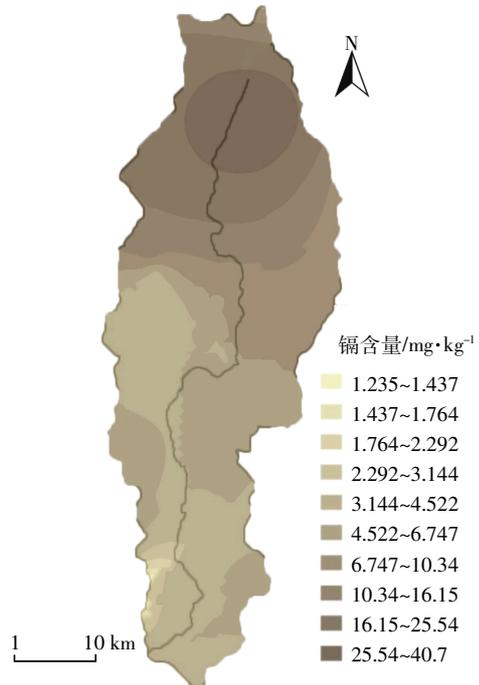


图7 沘江流域土壤重金属镉空间分布
Figure 7 The Cd spatial distribution in Bijiang basin

铅超标 28 个、汞超标 2 个。镉、铅、锌、砷的超标率达到了 94.29%、80.00%、48.57%和 37.14%。单因子指数分析结果也与地统计分析结果一致,其结果也可以看出沘江流域农田土壤重金属污染主要以镉、铅、锌、砷

为主,且镉、铅污染较为严重。

当评定区域内土壤质量作为一个整体与外区域土壤质量比较,或土壤同时被多种重金属元素污染时,需将单项污染指数按一定方法综合起来,应用综

合污染指数法进行评价。综合污染评价采用兼顾单元素污染指数平均值和最大值的内梅罗综合污染指数法。该方法不仅突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响,而且能反映出各种污染物对土壤环境的作用,将研究区域土壤环境质量作为一个整体与外区域或历史资料进行比较。但是没有考虑土壤中各种污染物对作物毒害的差别,只能反映污染的程度而难于反映污染的质变特征^[23],适用于在单项污染物限制因子不明确时况。

应用内梅罗综合指数法评价结果(表 6),结果显示,沘江流域耕地土壤重金属综合污染指数为 0.68~96.81,平均值为 17.69,其中属于清洁、尚清洁的区域占全部取样点的 5.71%;已经有污染区域占 94.29%,其中 3.03%区域污染程度已经是中度污染,96.97%区域污染程度已经是严重污染。将水田与旱地分开相比较可以看出,水田污染指数为 2.68~96.81,均值为 19.32;而旱地污染指数为 0.68~50.36,均值为 14.57。其污染水平水田较为严重。

2.4 沘江流域耕地土壤潜在生态风险评价

Hacanson 潜在生态风险指数法,主要用于衡量土壤中重金属对环境存在的生态风险。该法不但考虑了土壤重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应和毒理学联系起来,综合考虑了重金属的毒性在土壤中普遍的迁移转化规律和评价区域对重金属污

染的敏感性,以及重金属区域背景值的差异,消除了区域差异影响,划分出单一重金属潜在危害的程度,体现了生物有效性和相对贡献及地理空间差异等特点,是综合反映重金属对生态环境影响潜力的指标,适合于对大区域范围的土壤进行评价比较。

应用 Hacanson 潜在生态风险指数法进行评价(表 7),结果显示沘江流域耕地土壤部分地区存在铅和汞的单项生态风险指数略大于 40,属于中等生态风险等级;砷、铜、锌的生态风险指数都小于 40,属于低生态风险等级;全流域以镉对生态潜在风险贡献最大,其潜在生态风险指数全流域均值为 727.75,单项生态风险处于极强水平,最大值甚至高达 4 024.5。各种重金属对耕地土壤潜在生态风险程度贡献大小依次为镉>铅>汞>砷>锌>铜。比较水田与旱地两者各项重金属潜在生态风险的贡献率大小顺序完全一致。而水田中的镉、铅、锌潜在生态风险指数都要大于旱地,而这 3 种重金属元素之前分析污染源主要都来自金顶矿区的开采,而水田的耕作方式(引江水灌溉)导致了其污染较早地严重,再一次说明了金顶矿区冶炼开采产生的主要重金属铅、锌、镉以沘江水为载体对沿江耕地土壤造成了重金属污染。综合潜在生态风险指数分析,全流域采样点均值为 773.38(介于 600 和 1 200 之间),属于很强生态风险水平;最大值 4 148.86(远远大于 1 200),属于极强生态风险范畴。

表 6 沘江流域耕地土壤重金属污染水平

Table 6 The heavy metals pollution level of arable soil in Bijiang basin

项目	平均值	最大值	最小值	超标率/%	
单因子污染指数	As P_i	1.07	3.66	0.19	37.14
	污染水平	轻污染	重污染	清洁	
Cu P_i	0.11	0.29	0.08	0	
	污染水平	清洁	清洁	清洁	
Zn P_i	2.20	13.16	0.20	48.57	
	污染水平	中污染	重污染	清洁	
Cd P_i	24.26	134.15	0.25	94.29	
	污染水平	重污染	重污染	清洁	
Pb P_i	4.18	14.36	0.65	80.00	
	污染水平	重污染	重污染	清洁	
Hg P_i	0.38	12.3	0.04	5.7	
	污染水平	清洁	重污染	清洁	
综合污染指数	全流域 $P_{\text{综}}$	17.69	96.81	0.68	—
	污染水平	重污染	重污染	安全	
	水田 $P_{\text{综}}$	19.32	96.81	2.68	—
	污染水平	重污染	重污染	中污染	
	旱地 $P_{\text{综}}$	14.57	50.36	0.68	—
	污染水平	重污染	重污染	安全	

表7 重金属单项与综合潜在生态风险指数
Table 7 The single and comprehensive *RI* of heavy metals

类型	统计	单项潜在生态风险指数						综合潜在生态 风险指数
		As	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	
全流域	范围	1.24~19.43	0.05~1.45	0.24~13.16	7.50~4 024.5	0.01~71.78	1.60~41.6	23.10~4 148.86
	均值	8.95	0.56	2.31	727.75	19.11	15.06	773.38
水田	范围	1.24~12.50	0.05~1.45	0.24~13.16	94.50~4 024.50	0.01~71.78	1.60~41.60	137.21~4 148.86
	均值	8.21	0.59	2.88	785.31	19.12	15.06	843.35
旱地	范围	5.37~19.43	0.05~1.05	0.40~6.43	7.50~2 103.00	0.01~62.56	5.60~23.20	23.10~2 139.32
	均值	10.37	0.51	2.58	602.18	18.54	15.07	639.28

3 结论

(1) 沘江流域耕地土壤中, 重金属锌、镉、铅、砷、铜、汞累积量均值分别为 579.15、4.85、1 146.97、26.85、11.24、0.19 mg·kg⁻¹, 全流域采样点中锌、镉、铅、砷有 48.57%、94.29%、80.00%、37.14% 区域累积量超过《土壤环境质量标准》(GB 1561—1995) 二级标准限值。其中铅、镉远远超过土壤环境质量国家二级标准限值, 砷、铜、汞未超国家二级标准。

(2) 沘江流域耕地土壤, 重金属砷、锌、镉、铅累积量在兰坪县及其周边最高, 并都以其为中心向下游辐射递减, 呈现一定带状分布规律, 说明兰坪县及其周边区域是砷、锌、镉、铅污染的一个主要非面源污染源。而铜、汞分布没有明显较高区域, 分布规律性和空间相关性较弱, 说明铜、汞的累积来自于不同的面源污染。

(3) 所有采样检测点中, 仅有 5.71% 耕地土壤属于清洁或者尚清洁。E_{ir} 和 RI 结果一致, 以镉污染最为严重, 对沘江流域耕地土壤生态环境潜在影响极其强烈, 其贡献程度远远高于研究中其他 5 种重金属, 对矿区的治理和防止矿区污染物扩散是消除镉对沘江流域生态威胁的重要措施。

(4) 沘江流域耕地土壤除了砷、汞以外, 铅、锌、铜、镉水田平均含量均略高于旱地。总体上水田重金属污染高于旱地, 但差别不明显, 其原因主要有两方面: 一是沘江流域水田种植历史虽长, 但上游铅锌矿区的开采冶炼活动造成污染时间却不久; 二是沘江水田的种植有水稻小麦轮作的习惯, 并非只种植水稻。

参考文献:

[1] 任旭喜. 土壤重金属污染及防治对策研究 [J]. 环境保护科学, 1999, 25(5):31-33.
REN Xu-xi. The heavy metal pollution in soil and the prevention mea-

surement[J]. *Environmental Protection Science*, 1999, 25(5):31-33. (in Chinese)

[2] 臧宏伟, 史衍玺, 孔凡美. 鲁西北高产粮田土壤重金属环境质量评价 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(9):432-434.

ZANG Hong-wei, SHI Yan-xi, KONG Fan-mei. Evaluation on environmental quality of heavy metals in soils of grain area in the northwest of Shandong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(9):432-434. (in Chinese)

[3] 周鸿斌, 角媛梅, 史正涛, 等. 云南沘江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1586-1591.

ZHOU Hong-bin, JIAO Yuan-mei, SHI Zheng-tao, et al. Magnetic analysis and assessment on heavy metal contamination in the farmland soil along Bijiang River in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1586-1591. (in Chinese)

[4] 赵筱青, 杨红辉, 易琦, 等. 沘江流域农田土壤重金属污染特征及原因剖析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12):7569-7573.

ZHAO Xiao-qing, YANG Hong-hui, YI Qi, et al. Characteristics and reasons of heavy metal pollution in farmland soils in Bijiang watershed [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(12):7569-7573. (in Chinese)

[5] 李俊莉, 宋华明. 土壤理化性质对重金属行为的影响分析[J]. 环境科学动态, 2003(1):23-25.

LI Jun-li, SONG Hua-ming. Effects of soil physical and chemical properties on heavy metals[J]. *Environmental Science Trends*, 2003(1):23-25. (in Chinese)

[6] 罗强, 任永波, 郑传刚. 土壤重金属污染及防治措施[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(2):42-46.

LUO Qiang, REN Yong-bo, ZHENG Chuan-gang. Research on heavy metal pollution in soil and control[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2004, 26(2):42-46. (in Chinese)

[7] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 资源与人居环境, 2014(4):26-27.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Ministry of Environmental Protection and Ministry of Land and Resources issued a national survey of soil pollution Bulletin [J]. *Resources Inhabitant And Environment*, 2014(4):26-27. (in Chinese)

[8] 赵其国. 土壤污染与安全健康—以经济快速发展地区为例[C]. 第四次全国土壤生物与生物化学学术研讨会论文集, 广州: 2007.

ZHAO Qi-guo. Soil pollution, safety and health: A case study of a region

- with rapid economic development[C]. Proceedings of the Fourth National symposium on soil biology and biochemistry, Guangzhou;2007. (in Chinese)
- [9] 宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2):293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2):293-298. (in Chinese)
- [10] 梁桂莲, 钱建平, 张力. 我国铅锌矿污染特点及修复技术[J]. 矿业研究与发展, 2011, 31(4):84-95.
LIANG Gui-lian, QIAN Jian-ping, ZHANG Li. Features and remediation technologies of pollution in lead-zinc mining areas of China[J]. *Mining Research and Development*, 2011, 31(4):84-95. (in Chinese)
- [11] 江宏, 马友华, 尹国庆, 等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4):352-359.
JIANG Hong, MA You-hua, YIN Guo-qing, et al. Evaluation on heavy metal pollution and potential ecological risk of farmland soils in a county of Anhui Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4):352-359. (in Chinese)
- [12] 李梅, 孙嘉龙, 瞿丽雅. 赫章县镉污染调查及对人体健康的影响[J]. 贵阳医学院学报, 2007, 32(5):464-466.
LI Mei, SUN Jia-long, QU Li-ya. A survey of cadmium pollution in Hezhang County and its effects on human health[J]. *Journal of Guiyang Medical College*, 2007, 32(5):464-466. (in Chinese)
- [13] 蔡美芳, 党志, 文震, 等. 矿区周围土壤中重金属危害性评估研究[J]. 生态环境, 2004, 13(1):6-8.
CAI Mei-fang, DANG Zhi, WEN Zhen, et al. Risk assessment of heavy metals contamination of soils around mining area[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1):6-8. (in Chinese)
- [14] 苏跃龙. 沱江污染及危害综合防治对策初探[J]. 云南环境科学, 2004, 23:118-120.
SU Yue-long. Initial exploration of overall prevention and control countermeasures for pollution and danger in Bijiang River [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2004, 23:118-120. (in Chinese)
- [15] 王李鸿, 角媛梅, 明庆忠, 等. 云南省沱江流域水体重金属污染评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(5):595-600.
WANG Li-hong, JIAO Yuan-mei, MING Qing-zhong, et al. Evaluation of heavy metal pollution in Bijiang Basin in Yunnan Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(5):595-600. (in Chinese)
- [16] 易琦, 窦小东, 赵筱青, 等. 沱江水体重金属污染的沿程变化特征[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(15):6848-6852.
YI Qi, DOU Xiao-dong, ZHAO Xiao-qing, et al. Variation characteristics of heavy metal pollution in water body along the Bijiang River[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(15):6848-6852. (in Chinese)
- [17] 陈春. 沱江流域环境保护综合治理措施探讨[J]. 环境科学导刊, 2013, 32(2):52-57.
CHEN Chun. A discussion about comprehensive environmental treatment and protection in Bijiang River catchment[J]. *Environmental Science Survey*, 2013, 32(2):52-57. (in Chinese)
- [18] 康宏宇, 康日峰, 张乃明, 等. 迪庆某铜矿土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(1):75-81.
KANG Hong-yu, KANG Ri-feng, ZHANG Nai-ming, et al. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils in a copper mine in Diqing autonomous prefecture[J]. *Environmental Science Survey*, 2016, 35(1):75-81. (in Chinese)
- [19] 赵筱青, 李丽娇, 杨红辉, 等. 云南沱江流域农田土壤重金属 Pb、Zn、Cd、As 的地球化学特征[J]. 地球学报, 2012, 33(3):331-340.
ZHAO Xiao-qing, LI Li-jiao, YANG Hong-hui, et al. The geochemical characteristics of heavy metals in agricultural soils of the Bijiang Watershed in Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(3):331-340. (in Chinese)
- [20] 云南省环境科学研究院. 云南省沱江流域水污染防治规划[R]. 昆明: 云南省环境科学研究院, 2009.
Yunnan Institute of Environmental Science. Water pollution prevention and control planning of Bijiang River Basin in Yunnan Province [R]. Kunming: Yunnan Institute of Environmental Science, 2009. (in Chinese)
- [21] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 兰坪金顶铅锌矿区土壤重金属 Zn、Cd 分布特征研究[J]. 地质论评, 2009, 55(1):126-133.
LI Rui-ping, WANG An-jian, CAO Dian-hua, et al. Research on the distribution characteristics of Zn, Cd in the soil of Jinding, Pb-Zn Deposit, Lanping County[J]. *Geological Review*, 2009, 55(1):126-133. (in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:14-19.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis(3rd edion)[M]. DSM-III, Beijing:China Agriculture Precess, 2000:14-19. (in Chinese)
- [23] 徐争启, 倪师军, 张成玖, 等. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J]. 四川环境, 2004, 23(3):64-67.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiu, et al. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua Area by pollution load index[J]. *Sichuan Environment*, 2004, 23(3):64-67. (in Chinese)
- [24] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1):3-11.
GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1):3-11. (in Chinese)
- [25] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(17):310-315.
FAN Shuan-xi, GAN Zhuo-ting, LI Mei-juan, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17):310-315. (in Chinese)
- [26] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14 (8):975-1001.
- [27] 徐争启, 倪师军, 唐先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy

- metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115. (in Chinese)
- [28] 赵沁娜, 徐启新, 杨 凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2005, 3(1):111-116.
ZHAO Qin-na, XU Qi-xin, YANG Kai. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Sciences*, 2005, 3(1):111-116. (in Chinese)
- [29] 郭 平, 谢忠雷, 李 军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1):108-112.
GUO Ping, XIE Zhong-lei, LI Jun, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1):108-112. (in Chinese)
- [30] 孙英君, 王劲峰, 柏延臣. 地统计学方法进展研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2):268-274.
SUN Ying-jun, WANG Jin-feng, BAI Yan-chen. Study on progress of methods in geostatistics[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(2):268-274. (in Chinese)
- [31] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4):557-563.
GUO Xu-dong, FU Bo-jie, MA Ke-ming, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):557-563. (in Chinese)