

洞庭湖区典型蔬菜土壤镉、铜、锌、铅含量状况及评价

何飞飞¹, 曾建兵¹, 赵中涛², 杨君³

(1. 湖南农业大学 生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128;

2. 湖南省计量检测研究院, 湖南 长沙 410004; 3. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 采用单项污染指数和综合污染指数法对湖南洞庭湖区典型蔬菜土壤 Cd、Cu、Zn、Pb 含量状况进行了评价。结果表明,与湖南省潮土土壤背景值相比,土壤 Cd、Cu 和 Zn 含量明显富集,Pb 含量总体不高。与国家土壤质量二级标准(GB15618—1995)相比,洞庭湖区蔬菜土壤以 Cd 污染为主,其次是 Zn 和 Cu。Pb 含量没有超标,其中湘阴县、沅江市、资阳区和赫山区蔬菜土壤环境质量为轻度污染,华容县处于警戒水平,需要修复治理或者改变土地利用方式。君山区和南县蔬菜土壤为清洁水平,适宜发展无公害蔬菜。污染风险高的区域土壤 Cd、Cu 和 Zn 之间存在极显著或显著正相关关系,但相关性弱。

关键词: 重金属; 蔬菜土壤; 洞庭湖区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0235-05

中图分类号: X502

Evaluation of Cd, Cu, Zn and Pb Contents in Vegetable Soils Around Dongting Lake

HE Fei-fei¹, ZENG Jiang-bing¹, ZHAO Zhong-tao², YANG Jun³

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Hu'nan Agricultural University, Changsha,

Hu'nan 410128, China; 2. Hu'nan Institute of Metrology & Test, Changsha, Hu'nan 410004, China;

3. College of Resources and Environment, Hu'nan Agricultural University, Changsha, Hu'nan 410128, China)

Abstract: The contents and potential pollution risks of Cd, Cu, Zn and Pb were studied in vegetable soil around Dongting Lake in Hu'nan Province. The results showed that the contents of Cd, Cu and Zn in top soil were higher than the background values, while Pb contents were lower. With single pollution index and comprehensive pollution index, the ascending order of the risks of heavy metal pollution was Cd>Zn>Cu in vegetable soils. Pollution of Pb was not found in the whole study area. Based on the pollution index and comprehensive pollution index of soil heavy metals, the vegetable soil of Xiangyin County, Yuanjiang District, Ziyang District and Haoshan District belonged to polluted soil, and the soil of Huarong County exhibited warning pollution level, requiring immediate remediation or change in the pattern of land use. By contrast, the soils collected from Junshan District and Nanxian County were almost free to pollution, suitable for the cultivation of green vegetables. The relationship of soil Cd, Cu and Zn content was significantly positive, while the coefficients were low.

Keywords: heavy metal; vegetable soil; Dongting Lake

谷类和蔬菜是重金属等污染物摄入人体的主要来源^[1-2],随着城镇化、工业化以及农用化学品过度施用,中国蔬菜土壤重金属污染问题日益突出^[3-5]。湖南省有色金属储量丰富,重金属污染问题也较为严峻,长沙—株洲地区蔬菜基地土壤污染综合指数处于警戒线附近,其中 Cd 和 Cu 含量较高^[6-7],株洲离污染源 4 km 处的苋菜镉含量高达 6.03 mg/L^[8],湘江

流域蔬菜和水稻重金属含量超过食用标准^[9]。洞庭湖区是我国粮食主产区,同时也处于长江中上游冬春菜优势带,近年来瓜菜种植发展迅速^[10],但洞庭湖水相、滩地、洲垸和耕地土壤重金属含量和潜在污染风险较高^[11-14],这直接影响该区域蔬菜产品食用卫生安全、菜农增产增收和蔬菜产品竞争力的提高。本研究以东洞庭湖和南洞庭湖典型蔬菜生产基地为主要调

收稿日期:2012-03-03

修回日期:2012-03-05

资助项目:湖南省质量监督局 2009 年标准化研究项目“湖南洞庭湖区重金属污染菜田土壤修复技术的标准化研究”;湖南农业大学引进人才科学基金项目(06YJ31)

作者简介:何飞飞(1976—),女(汉族),云南省保山市人,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为农业生态系统养分循环。E-mail:hefeifei@126.com。

通信作者:杨君(1976—),女(汉族),湖南省邵阳市人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为土地资源管理。E-mail:yangjun_ly@163.com。

查区,在岳阳市和益阳市选取 7 个(区)县市(包括湘阴县、君山区、华容县、南县、沅江市、资阳区、赫山区)为取样点,对其中 15 个乡镇街道办 18 个蔬菜基地土壤 Cd, Pb, Cu, Zn 这 4 种重金属元素进行了分析与评价,旨在为该区域蔬菜种植区化和种植结构优化提供参考。

1 样品采集与测定

1.1 样品采集

于 2010 年 5 月份实地考察并采集土样。采样区以东洞庭湖和南洞庭湖平原为主(28°48′—N29°31′N, 112°41′—E113°03′E),选择有代表性的岳阳市湘阴县(文星镇和城西镇)、君山区(广兴洲镇和建新农场)、华容县(终南镇和插旗镇)、益阳市南县(乌嘴乡、河口镇、北洲子镇和南湖湾街道办)、沅江市(草尾镇和庆云山街道办)、资阳区(长春镇和大码头街道办)、赫山区(兰溪镇),共计 7 个区域 15 个乡镇街道办 18 个蔬菜基地。采样区地形地貌以河流冲积平原为主,土壤类型主要为河流冲积物发育而成的潮土。在蔬菜基地内,每 0.8 hm² 用 5 点法采集 0—20 cm 耕作层土壤混合成 1 个土壤样品,共采集混合样品 61 个。室内风干后,研磨,用四分法分别过 20 和 100 目筛。

1.2 样品测定

过 100 目筛的土壤样品用 HCL—HNO₃—HF^[15] 消解。土壤 Cd, Cu, Zn, Pb 采用原子吸收光谱仪(AA240FS)测定,其中土壤全 Cd 采用石墨炉法测定,基体改进剂为磷酸二氢铵,土壤全 Cu, Zn, Pb 采用火焰法测定。分析过程加入国家标准土壤样品(CBW07429)进行质量控制。标准土壤样品测定值与标准值间相对误差小于 5%,标准土壤样品平行测定值变异系数小于 10%。过 20 目筛土壤样品测定 pH 值,液土比为 5:1, pH 计测定。

赫山区和资阳区 2 个区域样本数据合并进行分析。数据整理用 Excel 软件,数据转换用 Minitab 15.0 的 Box—Cox,数据正态分布检验用 SPSS 13.0 的 Explore 完成(Shapiro—Wilk 法)。

2 土壤中重金属的评价标准与评价方法

洞庭湖区典型蔬菜基地土壤样品重金属污染程度采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法进行评价,污染物背景值为国家土壤质量二级标准(GB15618—1995)。

单因子污染指数 P_i 计算公式为: $P_i = C_i/S_i$
式中: P_i ——土壤中污染元素 i 的污染指数; C_i ——污染元素 i 的浓度实测值; S_i ——污染元素 i 的评价

限量值。

内梅罗综合污染指数 $P_{综}$ 计算公式:

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}}$$

式中: $P_{综}$ ——综合污染指数; P_{ave} ——单项污染指数 P_i 的平均值; P_{max} ——单项污染指数 P_i 的最大值。

当土壤 $P \leq 0.7$ 为清洁; $0.7 < P \leq 1.0$ 为尚清洁,警戒线; $1.0 < P \leq 2.0$ 为轻污染; $2.0 < P \leq 3.0$ 为中污染; $P > 3.0$ 为重污染。此分级对单因子污染指数 P_i 和内梅罗综合污染指数 $P_{综}$ 均适用。

3 结果与讨论

3.1 蔬菜基地土壤 Cd, Cu, Zn, Pb 含量与湖南省潮土土壤背景值的比较

对洞庭湖不同区域蔬菜基地样本数据进行正态分布检验(Shapiro—Wilk 法),从表 1 可以看出,君山区 Pb 含量变化范围较大,经 Box—Cox 转换后仍不服从正态分布;湘阴县 Pb 含量、沅江市 Zn 含量和 Pb 含量、南县 Pb 含量用 Minitab 的 Box—Cox 转换后服从正态分布,Box—Cox 平均值是采用 Box—Cox 转换的逆运算而得,即:

$$z = \sqrt[\lambda]{y, \lambda + 1}$$

式中: z ——Box—Cox 平均值; y ——Box—Cox 转换后的平均值; λ ——最优转换系数;分别取值为 -2.0, -1.0, -1.0, -2.0。

沅江市 Cu 含量、资阳—赫山 Cd 含量服从对数正态分布;其余区域重金属元素样本数据服从正态分布。从平均水平来看,君山区、华容县、湘阴县和南县、沅江市、资阳—赫山蔬菜土壤 Cd 含量分别为 0.33, 0.42, 0.49, 0.38, 0.61 和 0.40 mg/kg,均超过湖南省潮土土壤背景值背景值,最高值位于沅江市(1.39 和 1.36 mg/kg)。6 个区域 Cu 含量平均水平分别为 38.21, 23.67, 38.89, 30.60, 27.31 和 25.83 mg/kg,君山区、湘阴县和南县超出背景值,土壤 Cu 含量最大值出现在沅江市(112.35 mg/kg)。Zn 含量平均值分别为 209.48, 114.33, 204.15, 122.78, 118.91 和 182.77 mg/kg, Zn 含量最大值出现在沅江市(336.52 mg/kg)。6 个区域土壤 Pb 含量不高,只有君山区和华容县超出背景值。

3.2 各蔬菜基地土壤 Cd, Cu, Zn, Pb 污染风险评价

以国家土壤环境质量二级土壤(GB15618—1995)为评价标准,从单项污染指数平均水平来看,洞庭湖蔬菜土壤 Cd 轻度污染($P_i = 1.19$),土壤 Zn, Cu 和 Pb 总体处于清洁水平。具体来看,华容、湘阴、沅江、资阳—赫山土壤 Cd 处于轻度污染,君山区和南

县属清洁水平,但污染指数变化范围较大,从 0.29~4.65,从单项污染指数的等级来看土壤 Cd 污染风险由高到低的顺序为:沅江市>湘阴县>资阳—赫山>华容县>南县>君山区。湘阴土壤 Cu 含量处于警戒水平,其余 5 个区域总体而言为清洁水平,但沅江和资阳—赫山污染指数变化范围为 0.21~2.25,华容县和南县全部采样点均清洁。湘阴土壤 Zn 含量处于警戒线与轻度污染之间,资阳—赫山处于警戒

线,君山区和沅江处于清洁水平的最高值,华容全部采样点均为清洁,土壤 Zn 污染风险由高到低的顺序为:湘阴县>资阳—赫山>沅江市>君山区。全部样本土壤 Pb 均清洁。综合 4 种重金属来分析,本研究采样区域综合污染指数为 1.06,处于警戒线水平,其中,湘阴县、沅江市和资阳—赫山综合污染指数大于 1,为轻度污染;华容县综合污染指数为 0.92,处于警戒线水平;君山区总体情况良好,为清洁水平(表 2)。

表 1 洞庭湖区不同区域蔬菜土壤镉、铜、锌、铅含量分布状况

采样区域	重金属元素	样品个数	范围/ (mg · kg ⁻¹)	中值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值(标准差)/ (mg · kg ⁻¹)
岳阳市君山区	Cd	16	0.09~0.33	0.31	0.33(0.13) ^a
	Cu		9.10~58.32	25.65	38.21(14.67) ^a
	Zn		118.10~271.30	216.09	209.48(48.15) ^a
	Pb		12.56~84.19	69.29	56.79(26.19) ^a
岳阳市华容县	Cd	4	0.24~0.59	0.43	0.42(0.15) ^a
	Cu		17.70~32.38	22.30	23.67(6.41) ^a
	Zn		69.69~139.20	124.21	114.33(30.82) ^a
	Pb		10.31~64.10	21.32	29.26(23.82) ^a
岳阳市湘阴县	Cd	11	0.17~0.78	0.50	0.49(0.18) ^a
	Cu		13.39~65.12	38.09	38.89(17.69) ^a
	Zn		73.45~321.63	198.73	204.15(78.07) ^a
	Pb		15.32~56.18	20.15	27.12(14.93) ^a /20.86(1.00) ^b
益阳市南县	Cd	11	0.22~0.62	0.38	0.38(0.13) ^a
	Cu		10.37~47.96	29.80	30.60(11.34) ^a
	Zn		91.02~154.40	120.07	122.78(19.03) ^a
	Pb		10.31~64.10	21.32	29.26(23.82) ^a /20.43(1.00) ^b
益阳沅江市	Cd	11	0.12~1.39	0.43	0.61(0.44) ^a
	Cu		10.53~112.35	25.30	33.84(28.23) ^a /27.31(1.63) ^c
	Zn		75.68~336.52	120.44	146.09(86.35) ^a /118.91(1.00) ^b
	Pb		10.96~59.41	17.37	24.05(16.17) ^a /18.48(1.02) ^b
益阳市 资阳—赫山	Cd	8	0.27~0.82	0.37	0.43(0.18) ^a /0.40(0.35) ^c
	Cu		14.54~42.37	23.63	25.83(11.07) ^a
	Zn		122.54~253.12	177.75	182.77(52.27) ^a
	Pb		11.51~22.19	15.21	15.67(14.76) ^a

注:(1) 标有 a,b,c 上标的数据分别代表算术平均值(标准差),Box—Cox 平均值(标准差)和几何平均值(标准差)。(2) 湖南省潮土土壤 Cd, Cu, Zn, Pb 背景值平均值分别为:0.18,32,98,23 mg/kg。

表 2 洞庭湖区不同蔬菜土壤镉、铜、锌、铅污染指数及评价等级

采样区域	土壤 pH	单项污染指数				综合污染指数	污染等级
		Cd	Cu	Zn	Pb		
岳阳市君山区	6.01~8.12	0.55(0.29~0.98)	0.28(0.09~0.58)	0.70(0.39~0.90)	0.16(0.04~0.24)	0.65	清洁
岳阳市华容县	5.74~6.77	1.09(0.40~1.95)	0.34(0.20~0.49)	0.49(0.23~0.70)	0.11(0.03~0.26)	0.92	尚清洁
岳阳市湘阴县	7.91~8.64	1.64(0.57~2.61)	0.73(0.27~1.30)	1.01(0.29~1.61)	0.11(0.06~0.22)	1.45	轻度污染
益阳市南县	7.83~8.07	0.63(0.36~1.03)	0.31(0.10~0.48)	0.41(0.30~0.51)	0.08(0.04~0.21)	0.57	清洁
益阳沅江市	5.65~7.52	1.80(0.31~4.65)	0.59(0.21~2.25)	0.70(0.30~1.68)	0.09(0.04~0.24)	1.50	轻度污染
益阳市资阳—赫山	5.62~5.98	1.42(0.91~2.74)	0.52(0.29~0.85)	0.91(0.61~1.27)	0.06(0.05~0.09)	1.24	轻度污染
平均值		1.19	0.46	0.70	0.10	1.06	尚清洁

注:括号内数值为平均值的范围。

由表 1—2 可以看出,洞庭湖区蔬菜土壤存在重金属污染的潜在风险,其中 Cd 污染问题较为普遍。另外 6 个区域 4 种重金属元素含量范围变幅较大,最大值与最小值之间相差 1.7~11.9 倍,这种突变可能与人类活动有关。根据调查区内各采样点所处的地理位置,重金属程度总体上表现为:湘阴县、沅江市、资阳—赫区>华容县,君山区和南县没有超标。超标采样点均在城乡结合带,交通相对发达,周围布有各种类型的加工和制造企业。离污染源的距離是影响土壤重金属浓度的重要因素^[16-17]。君山区和南县的采样点附近以种植业为主,没有污染源,不存在这 4 种重金属超标问题。研究结果表明,Cd 是洞庭湖区典型蔬菜基地污染程度和范围最大的重金属,这与在环洞庭湖区域(长沙—株洲地区)研究结果相同^[6]。中国菜地 24.1%存在 Cd 超标,重金属污染中排第 1 位^[18]。工农业以及城市发展是造成土壤 Cd 污染的重要因素。湘江、资江、沅水、澧水等上游地区有色金属矿场以及沿岸大型冶炼厂、化工厂林立;湘阴境内有重金属污染严重的湘江^[19],在 2005 年湘江流域突发 Cd 和 As 严重污染事件发生;长株潭内环交通繁忙区和有色金属生产工业区近地表灰尘 Cd 污染达到严重污染级别^[20];农业生产大量施用化肥、农药等也会增加土壤 Cd 含量,如洞庭湖区 2002 年化肥用量 10 000 t,其中磷肥占 40%^[13],磷肥本身含有一定量的 Cd^[21-22],长期施用会导致土壤 Cd 的累积^[23-26]。相关性统计分析表明(表 3),全部样本($n=61$)Cd 和 Cu ($r=0.549^{**}$),Cd 和 Zn($r=0.284^*$),Cu 和 Zn($r=0.309^*$);处于警戒线和轻度污染的样本(湘阴、沅江、资阳—赫山、华容地区, $n=34$)Cd 和 Cu ($r=0.604^{**}$),Cd 和 Zn ($r=0.417^*$),Cu 和 Zn ($r=0.447^*$),相关系数增大,说明警戒线和轻度污染下 Cd,Cu 和 Zn 来源的一致性更高。但由于地理位置和环境条件的差异,蔬菜土壤 Cd,Cu 和 Zn 的来源可能比较复杂,这也是决定系数(r^2)不高,只存在弱相关关系的主要原因。

表 3 洞庭湖区不同蔬菜土壤镉、铜、锌、铅之间的相关性

重金属元素	Cd	Cu	Zn	Pb
Cd	1(1)	0.549 ^{**} (0.604 ^{**})	0.284 [*] (0.417 [*])	-0.254(-0.258)
Cu		1	0.309 [*] (0.447 [*])	-0.271(-0.232)
Zn			1	0.266(0.090)
Pb				1

注: ** $p < 0.01$ 水平; * $p < 0.05$ 水平;括号内的数据为处于警戒线和轻度污染样本相关性($n=34$)。

4 结论

洞庭湖不同区域蔬菜基地土壤 Cd 污染状况较为普遍,其次为 Zn 和 Cu,Pb 没有污染。Cd,Zn 和 Cu 污染来源存在一定程度的一致性,可能是工业废水、城市生活污水、交通和大气沉降等原因所致。单因子评价结果与重金属含量分析一致。综合评价结果表明,湘阴、沅江和资阳—赫山这 3 个区域蔬菜土壤为轻度污染,华容地区处于警戒线,在农业措施上应采取施用石灰等碱性物质提高土壤 pH 值以降低重金属的生物毒性。对于附近有工业污染源的蔬菜土壤可种植花卉或苗木等园艺植物,或者改变土地利用方式。君山区和和南县菜地土壤属于清洁水平,适宜发展无公害蔬菜。

本研究只对沿洞庭湖岳阳市和益阳市 7 个区(县)市蔬菜土壤中 4 种重金属元素的含量分布特征做了探讨,对其它重金属元素及其空间分异的原因,以及污灌或大气沉降等途径中的重金属对土壤重金属累积或变化的贡献还需进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 诸洪达,王继先,诸如松,等. 中国人食品中元素浓度和膳食摄入量研究[J]. 中华放射医学与保护, 2000, 6(20):378-384.
- [2] Kachenko A G, Singh B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2006, 169(1/4):101-123.
- [3] 宋波,陈同斌,郑袁明,等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [4] Huang Shaowen, Jin Jiyu. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use[J]. Environ. Monit. Assess., 2008, 139(1/3):317-327.
- [5] 张伯尧,郑华平,张仁陟. 兰州市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2009(6): 112-116.
- [6] 朱奇宏,黄道友,樊睿,等. 环洞庭湖区典型蔬菜基地土壤重金属污染状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S1):22-26.
- [7] 李明德,汤海涛,汤睿,等. 长沙市郊蔬菜土壤和蔬菜重金属污染状况调查及评价[J]. 湖南农业科学, 2005(3): 34-36.
- [8] 王秋衡,王淑云,刘美英. 湖南湘江流域污染的安全评价[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8):8-10.
- [9] Wang A S, Scott Anglel J, Rufus L, et al. Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant and Soil, 2006, 281(1/2):325-337.

- [10] 粟建文,胡新军,袁祖华,等. 湖南环洞庭湖区南瓜产业现状与发展对策[J]. 湖南农业科学,2010(1):90-92.
- [11] 申锐莉,鲍征宇,周旻,等. 洞庭湖湿地水相中重金属的地球化学评价[J]. 人民长江,2007,38(11):121-123.
- [12] 李永进,汤玉喜,唐洁,等. 洞庭湖滩地重金属分布及其生态风险评价[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(2):55-29.
- [13] 董萌,赵运林,雷存喜,等. 南洞庭湖洲垸土壤中四种重金属的分布特征及污染状况评价[J]. 土壤,2010,42(3):452-458.
- [14] 周惜时,秦普丰,李学初,等. 洞庭湖平原区耕地环境质量初步评价[J]. 环境科学与技术,2007,30(6):55-58.
- [15] 王京文,徐文,周航,等. 土壤样品中重金属消解方法的探讨[J]. 浙江农业科学,2007(2):223-225.
- [16] 章圣强,郭瑞英,曹靖,等. 白银市日光温室土壤养分累积特征及重金属污染现状评价[J]. 农业环境科学学报,2010,29(4):711-716.
- [17] 曹伟,周生路,王国梁,等. 长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J]. 地理科学,2010,30(2):283-289.
- [18] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学,2007,40(11):2507-2517.
- [19] 刘耀驰,高栗,李志光,等. 湘江重金属污染现状、污染原因分析与对策探讨[J]. 环境保护科学,2010,36(4):25-28.
- [20] 龙永珍,邹海洋,戴塔根. 长株潭市区近地表灰尘中重金属分布污染研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(4):1633-1638.
- [21] 陈林华,倪吾钟,李雪莲,等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报,2009,26(2):224-228.
- [22] 李东坡,武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. 应用生态学报,2008,19(5):1158-1165.
- [23] 徐明岗,武海雯,刘景,等. 长期不同施肥下我国3种典型土壤重金属的累积特征[J]. 农业环境科学学报,2010,29(12):2319-2324.
- [24] 王俊,郭颖,吴蕊,等. 不同种植年限和施肥量对日光温室土壤锌累积的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(1):89-94.
- [25] 卢东,宗良纲,肖兴基,等. 华东典型地区有机与常规农业土壤重金属含量的比较研究[J]. 农业环境科学学报,2005,24(1):143-147.
- [26] 刘树堂,赵永厚,孙玉林,等. 25年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(1):164-167.

(上接第234页)

- [10] 陈莹,尹义星. 典型流域土地利用/覆被变化预测及景观生态效应分析:以太湖上游西苕溪流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(8):765-770.
- [11] 赵志轩. 海河流域景观空间梯度格局及其环境因子的关系[J]. 生态学报,2011,31(7):1925-1935.
- [12] 徐海洋. 水电梯级开发对乌江流域景观生态系统的影响[J]. 水利水电,2010,36(5):8-10.
- [13] 王仰麟,赵一斌,韩荡. 景观生态系统的空间结构:概念、指标与案例[J]. 地球科学进展,1999,14(3):235-241.
- [14] 傅伯杰,陈利顶,马克明,等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [15] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [16] 邓祥征,刘彦随,赵涛. 汉江流域土地利用变化及空间格局分析[J]. 长江流域资源与环境,2003,12(6):522-527.