

长江上游生态脆弱区土地利用结构及生态服务价值变化响应^① ——以甘肃省陇南市为例

刘英英¹, 石培基¹, 刘玲², 刘春雨¹, 潘竟虎¹, 党国峰¹

(1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191)

摘要: 利用陇南市 2003—2008 年土地利用变更调查数据和相关统计资料, 运用景观生态学中的结构定量方法分析, 计算出土地利用结构指数和生态服务价值, 分析土地利用结构与生态服务价值的变化及其相互关系。结果表明: 2003—2008 年陇南市土地利用结构多样性指数和均匀度增加而优势度降低。林地提供的生态服务价值最大, 土地利用生态服务价值总体呈增加趋势, 土地利用生态服务价值与土地利用结构线性相关。

关键词: 土地利用结构; 生态服务价值; 土地利用多样性; 陇南市

中图分类号: F301

土地利用是人类最基本的实践活动, 通过区域生态进程和服务间的相互作用直接影响区域生态服务价值^[1-4], 如何根据土地生态系统的服务功能及其变化调整土地利用结构, 是 2005 年新一轮土地利用规划修编的重要内容。生态系统服务价值是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[5]。王成等^[6]认为土地利用通过生态进程与服务间的相互作用影响生态系统提供的产品与服务; 陈士银^[7]计算了土地利用结构异质性指数和生态服务价值从而分析了土地利用结构与生态服务价值的变化及其相互关系; 王伟林等^[8]运用景观生态学中的结构分析定量方法以及威弗-托马斯组合类型分析法对南京市土地利用结构和区位进行了分析并计算生态系统服务价值变化; 万利等^[9]参照生态系统服务价值系数, 对比研究北京土地利用结构与生态系统服务价值的变化及其相互关系。上述研究均旨在为土地资源的可持续利用、生态环境的提高提供参考^[10-14]。

本文将对甘肃省陇南市 2003—2008 年、2010 年、2020 年预测数据土地利用结构和土地利用区位变化进行分析, 并对由此引起的生态系统服务价值变化进行计算, 分析土地利用结构、区位与生态系统服务价值变化之间的相互作用和关系。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

陇南市位于甘肃省东南边陲, 东连陕西, 南接四川, 北靠天水, 西连甘南, 介于 104°01′~106°34′E、32°35′~34°32′N, 辖八县一区, 2 个林业总场。全市土地总面积 2.79 万 hm^2 , 是甘肃唯一的长江流域地区。属于大陆性季风气候, 气候温和; 年平均气温 4℃~16℃; 平均 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的活动积温 3 596.5℃; 平均降雨量 400~1 000 mm; 平均无霜期 252 天; 平均日照 1 945.7 h; 平均年蒸发量 1 206.9 mm。地处中国大陆二级阶梯向三级阶梯的过渡地带, 位于秦巴山区、青藏高原、黄土高原三大地形交汇区域, 地形由西北到东南逐次降低, 素以“山大沟深”而著称。区域最低处海拔为 550 m, 最高处海拔为 4 187 m。土壤类型丰富, 分别为褐土、棕壤、暗棕壤、黄棕壤、红黏土、山地草甸土、黑垆土、黑钙土、新积土、水稻土、黑土、潮土、黄锦土, 面积分别占 49.36%、23.98%、5.29%、5.12%、3.81%、1.90%、1.55%、1.49%、1.0%、0.91%、0.61%、0.49%、0.31%。暗棕壤是主要的林业土壤, 低山丘陵区的褐土适宜于种植耐旱的干果类。近年随着陇南市经济不断发展, 城市化进程不断加快, 土地利用发生了较大变化, 引致生态系统服务价值随之发生变化。

1.2 数据来源

土地利用数据来自于陇南市国土资源的土地利用现状数据和变更数据, 社会经济资料来自历年《陇南市统计年鉴》。根据中国《土地利用现状调查技术规程》和土地用途、经营特点、利用方式和覆盖特征等因素

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40971078、41061017)、国家社会科学基金项目 (08AMZ003)、甘肃省自然科学基金项目 (0710RJZA104) 和西北师范大学科技创新项目 (NWNK-KJCXGU-03-20) 资助。

作者简介: 刘英英 (1984—), 女, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境影响评价。E-mail: yingliu7834666@163.com

作为土地利用分类依据，区分差异性，归纳共同点，将土地利用类型分为耕地、园地、林地、牧草地、其他农用地、城乡建设用地、交通水利设施用地、其他建设用地、水域和自然保留地共 10 个类型。

2 研究方法

2.1 土地利用格局变化分析

2.1.1 多样性分析模型 (1) 采用吉布斯-马丁多样化指数 (GM) [15]，主要分析区域内各种土地利用类型的齐全程度或多样化状况，公式：

$$GM_i = 1 - \sum_{j=1}^n X_{ij}^2 / \left(\sum_{j=1}^n X_{ij} \right)^2 \quad (1)$$

式中， X_{ij} 为第 i 年 第 j 种土地利用类型面积。

(2) 景观类型多样性指数 (H) [15]，可用来描述土地利用类型的丰富和复杂程度，公式：

$$H_i = - \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (2)$$

式中， P_{ij} 为第 i 年 第 j 种土地利用类型面积比例。

2.1.2 集中性分析模型 土地利用集中性主要反映研究区内土地利用类型面积分布的聚集程度及主要土地利用类型对整个研究区的控制程度。

(1) 土地利用优势度指数 (D) [15]，公式：

$$D_i = H_{\max} + \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

$$H_{\max} = \ln m \quad (4)$$

式中， $H_{\max}$ 为最大多样性指数， m 为给定区域最大的土地利用类型数。

(2) 土地利用均匀度指数 (E) [15]，该指数反映各种土地利用类型在面积上分布的不均匀程度。

$$E_i = H_i / H_{\max} \quad (5)$$

2.2 土地利用生态服务价值评价方法

本文在谢高地等 [16-18] 在 Costanza 等提出的评价模型基础上，对国内 700 位生态学者进行了问卷调查，计算出中国 1 个生态服务价值当量因子的经济价值量为 449.1 元/hm² (58.5 \$/hm²，按 2007 年基准价 7.68 元/\$ 计算)，得出了中国陆地生态系统服务价值当量因子表 (表 1)。

表 1 中国生态系统单位面积生态服务价值 (元/(hm²·a))
Table 1 Equivalent value per unit area of ecosystem services in China

一级类型	二级类型	森林	草地	农田	河流/湖泊	荒漠
供给服务	食物生产	148.20	193.11	449.10	238.02	8.98
	原材料生产	1 338.32	161.68	175.15	157.19	17.96
调节服务	气体调节	1 940.11	673.65	323.35	229.04	26.95
	气候调节	1 827.84	700.60	435.63	925.15	58.38
	水文调节	1 836.82	682.63	345.81	8 429.61	31.44
	废物处理	772.45	592.81	624.25	6 669.14	116.77
支持服务	保持土壤	1 805.38	1 005.98	660.18	184.13	76.35
	维持生物多样性	2 025.44	839.82	458.08	1 540.41	179.64
文化服务	提供美学景观	934.13	390.72	76.35	1 994.00	107.78
生态服务价值系数		12 628.69	5 241.00	3 547.89	20 366.69	624.25

表 1 仅提供了一个中国平均状态的生态系统生态服务价值的单价，陇南市各种生态系统的产量与全国平均状况相比，存在一定的差异，主要表现在农田、林地和草地，为此，按下述公式来进一步修订生态服务单价：

$$p_{ij} = (b_j / B) p_i \quad (6)$$

式中， p_{ij} 为订正后的单位面积生态系统的生态服务价值， $i = 1, 2, \dots, 9$ ，分别代表食物生产、原材料生产等不同类型的生态系统服务价值， $j = 1, 2, \dots, n$ ，

分别代表不同生态系统类型， b_j 为 j 区生态系统的产量， B 为中国某类生态系统单位面积平均产量， p_i 为中生态系统服务价值基准单价。其中，河流/湖泊和荒漠的价值当量与全国相比基本相当，故未做调整。

以森林为例说明，陇南市单位面积活立木产量为 45.87 m³/hm²，中国单位面积活立木蓄积量为 77.86 m³/hm²，故修正后的森林的系数为 0.589 2，进而得出陇南市森林修正后的单位面积的生态服务价值，其他土地类型亦是如此 (表 2)。

表 2 陇南市生态系统单位面积生态服务价值 (元/(hm²·a))

Table 2 Equivalent value per unit area of ecosystem services in Longnan

一级类型	二级类型	森林	草地	农田	河流/湖泊	荒漠
供给服务	食物生产	87.31	115.866	395.18	238.02	8.98
	原材料生产	788.47	97.008	154.12	157.19	17.96
调节服务	气体调节	1 143.02	404.19	284.53	229.04	26.95
	气候调节	1 076.88	420.36	383.33	925.15	58.38
	水文调节	1 082.17	409.578	304.29	8 429.61	31.44
	废物处理	455.09	355.686	549.30	6 669.14	116.77
支持服务	保持土壤	1 063.64	603.588	580.91	184.13	76.35
	维持生物多样性	1 193.29	503.892	403.08	1 540.41	179.64
文化服务	提供美学景观	550.34	234.432	67.18	1 994.00	107.78
生态服务价值系数		7 440.22	3 144.6	3 121.91	20 366.69	624.25

为研究土地利用变化对生态系统服务价值变化的影响,必须得到不同土地利用类型生态系统服务价值系数,参照已有的研究成果,将陇南市土地利用类型与划分的生态系统进行对照,表 2。

陇南市生态系统服务总价值,公式为:

$$ESV_i = \sum_{i=1}^n P_i A_i \quad (7)$$

式中, ESV_i 为 i 年的生态系统服务总价值, P_i 为 i 类型土地单位面积生态系统服务价值系数, A_i 为土地利用类型 i 的面积。

3 结果与分析

3.1 土地利用结构指数及其变化情况

根据陇南市 2003—2008 年土地利用变更调查数据计算,2003 年、2005 年和 2008 年多样化指数 GM 分别为 0.685 7、0.682 9 和 0.682 6, 呈现逐步降低的趋势,2003—2008 年期间降低了 0.46%,但总体上变化并不显著。

景观格局指数的大小反映了人类活动对土地的干扰程度,随干扰程度的增加,陇南市土地利用的多样性、均匀度提高,优势度减少。从表 3 可以看出,各县区土地利用多样性指数 H 值介于 0.978 4 ~ 2.343 8 之间,多样性程度较高,最高值是武都区、礼县,最低值是两当县;土地利用优势度指数 D 值介于 0.978 2 ~ 2.366 1 之间,两当县的土地利用的优势度最高,其次是徽县、康县、成县、文县,较高的 D 值反映出其土地利用类型相对比较单一,一种或少数几种利用结构的均衡程度。 E 值介于 0.287 7 ~ 0.705 5 之间,土地利用的均匀程度较低。本文采用灰色预测法、趋势外推预测法、平均增长率法预测得出陇南市各县区的土地类型数据,进而计算了 2010 年、2020 年的土地景观格局指数(图 1)。

由图 1 可知,到 2020 年陇南市总体土地利用多样性指数 H 、均匀度指数 E 均有升高。多样性指数 H 为 2.851 4,表示多样化程度仍较高,结果也是比较合理的,均匀度指数 E 为 0.858 4,也是处于不断上升趋势。

表 3 2003—2008 年陇南市土地利用结构指数

Table 3 Land use structure index of Longnan from 2003 to 2008

指数	年份(年)	陇南市	武都区	宕昌县	成县	康县	文县	西和县	礼县	两当县	徽县
H	2003	2.090 0	2.343 8	2.129 8	1.687 2	1.568 2	1.784 2	2.165 8	2.340 2	0.978 4	1.333 4
	2005	2.090 3	2.331 1	2.128 2	1.662 1	1.567 0	1.782 6	2.164 5	2.340 0	0.955 8	1.340 4
	2008	2.092 3	2.332 2	2.131 5	1.669 2	1.569 4	1.783 7	2.165 0	2.343 1	0.956 8	1.341 6
D	2003	1.231 9	0.978 2	1.192 1	1.634 8	1.753 8	1.537 8	1.156 2	0.981 8	2.343 5	1.988 5
	2005	1.231 7	0.990 8	1.193 7	1.659 9	1.755 0	1.539 4	1.157 5	0.981 9	2.366 1	1.981 5
	2008	1.229 6	0.989 7	1.190 4	1.652 8	1.752 5	1.538 2	1.156 9	0.978 8	2.365 1	1.980 3
E	2003	0.629 2	0.705 5	0.641 1	0.507 9	0.472 1	0.537 1	0.652 0	0.704 5	0.294 5	0.401 4
	2005	0.629 2	0.701 7	0.640 6	0.500 3	0.471 7	0.536 6	0.651 6	0.704 4	0.287 7	0.403 5
	2008	0.629 9	0.702 1	0.641 7	0.502 5	0.472 4	0.537 0	0.651 7	0.705 4	0.288 0	0.403 9

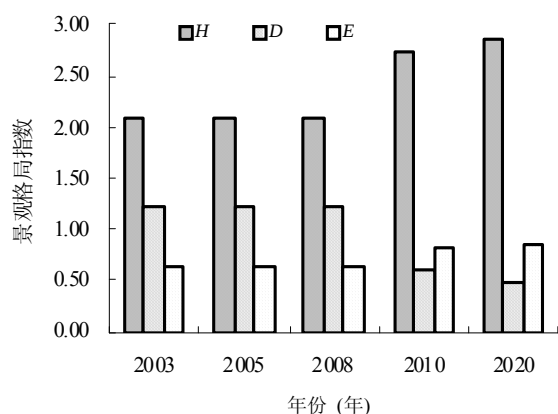


图1 2003—2008年、2010年、2020年陇南市土地利用景观格局指数

Fig. 1 Land use structure index of Longnan City from 2003 to 2020

势；而优势度指数 D 为 0.4706，说明土地利用类型比较单一的情况有所好转；到 2020 年陇南市总体土地利用景观格局指数处于良性发展状态，有利于生态环境整体质量的提升。

表4 2003—2008年、2010年、2020年陇南市土地利用生态服务价值（亿元）

Table 4 Ecosystem service value of land use types in Longnan City from 2003 to 2008、2010、2020

年份 (年)	耕地	园地	林地	牧草地	建设用地	水域	未利用地	合计
2003	17.58	0.58	102.05	13.14	0.29	5.96	1.08	140.67
2004	17.26	0.58	102.85	13.14	0.29	5.93	1.08	141.13
2005	17.221	0.60	102.94	13.13	0.29	5.93	1.08	141.19
2006	17.19	0.62	102.99	13.13	0.29	5.96	1.08	141.25
2007	17.17	0.63	103.01	13.13	0.29	5.96	1.08	141.26
2008	17.15	0.63	103.01	13.12	0.29	5.94	1.08	141.23
2010	17.12	0.66	103.51	12.59	0.36	5.93	1.08	141.25
2020	16.95	0.77	105.17	11.25	0.51	5.96	1.08	141.66
平均比重 (%)	12.18	0.45	73.08	9.08	0.23	4.21	0.76	100.00
ESV 增量	-0.63	0.19	3.12	-1.89	0.23	-0.02	-0.00	0.99
增长率 (%)	-3.57	33.39	3.06	-14.40	78.67	-0.37	-0.13	0.71

从图 2 可以看出陇南市土地利用生态服务总价值的变化趋势，基本上 2003—2004 年增长较快，增幅为 0.32%，2004—2007 年增长较慢，增幅为 0.10%，但 2007—2008 年由于地震灾害导致略微降低，降幅为 0.02%；但预计之后将出现明显增长。

3.3 土地利用与生态服务价值的关系

(1) 土地利用数量与生态服务价值。土地利用生态服务功能的经济价值由农作物播种面积、农作物产量及各土地利用类型的面积决定。从表 5 可以看出，2003—2020 年陇南市各土地利用类型中园地、林地和建设用地面积增加，其生态服务价值也相应增加，尤其林地面积增加最大，且提供的生态服务价值亦最大。

3.2 土地利用生态服务价值变化分析

由生态服务价值公式 (7) 计算陇南市 2003—2008 年、2010 年、2020 年土地利用生态服务价值 (表 4)，从表 4 中可以看出，林地的生态服务价值在陇南市土地利用生态服务价值功能整体价值中占相当大的比重，年均占总价值的 73.08%；其次是耕地和牧草地，年均分别占总价值的 23.18% 和 9.08%；水域仅占 4.21%；而园地、未利用地和建设用地所占比重很低，都在 0.80% 以下。2003—2020 年陇南市林地生态服务价值增加量最大，为 3.12 亿元，其次是建设用地和园地，分别是 0.23 亿元、0.19 亿元，而耕地、水域、牧草地、未利用地的生态服务价值合计降低 2.54 亿元。2020 年陇南市土地利用生态服务功能价值总量为 141.66 亿元，比 2003 年增加了 0.99 亿元，增长幅度为 0.71%。建设用地的增幅最高，达 78.67%，园地和林地分别为 33.39% 和 3.06%，但牧草地的为负，为 -14.40%，其他土地类型均为负值，但很小。

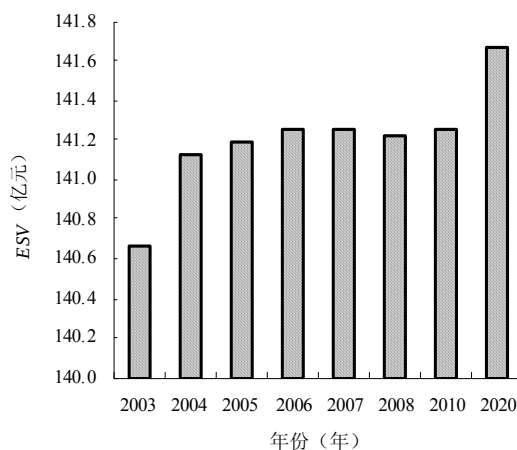


图2 陇南市土地利用生态服务总价值变化

Fig. 2 Change of ecological service value of land use ecosystem in Longnan City

表 5 陇南市土地面积与生态服务价值变化

Table 5 Variation of land area and its ecological services value in Longnan Ctiy

年份 (年)	耕地	园地	林地	牧草地	建设用地	水域	未利用地
2003	563 052.77	18 490.19	1 371 611.44	417 856.19	45 930.59	29 250.91	172 927.87
2020	542 948.87	24 664.62	1 413 547.83	357 665.88	82 062.27	29 143.71	172 696.07
面积增量 (hm ²)	-20 103.90	6 174.43	41 936.39	-60 190.31	36 131.68	-107.20	-231.80
ESV 增量 (亿元)	-0.627 6	0.192 8	3.120 2	-1.892 7	0.225 6	-0.021 8	-0.001 4

(2) 土地利用结构与生态服务价值。对生态系统服务价值与多样化指数 (GM)、多样性指数 (H)、优势度指数 (D) 和均匀度指数 (E) 进行相关分析, 运用 SPSS13.0 软件对 2003—2008 年的生态系统服务价值与多样化指数 (GM)、多样性指数 (H)、优势度指数 (D) 和均匀度指数 (E) 进行多元线性回归分析, 采用逐步回归的方法, 得到公式:

$$Y_{ESV} = 232.820 - 133.187GM - 1.034E \quad (R^2 = 0.846, F = 13.751, \text{在 } 95\% \text{ 的置信度水平下结果显著}).$$

因此, 土地利用结构的多样化和均匀化有利于提高区域生态系统服务价值。提高土地集约利用水平, 控制居民点及独立工矿用地等建设用地规模, 增加林地、园地等类型的土地数量可以增加生态系统服务价值。

需要说明的是, 当生态资源出现短缺或是被耗尽时, 生态系统才会被赋予市场价值, 市场价格和价值会随着需求的变化发生变化, 而在现有生态系统服务的价值研究中, 都没有考虑生态系统服务价值随资源供求状态的变化而变化。随着耕地面积的减少, 生态资源出现短缺, 生态系统服务价值单价也会随之增加。这将是我們下一步需要进行深入研究的内容。

4 结论

(1) 2003—2020 年, 陇南市土地利用的多样性指数 H 、均匀度指数 E 都呈上升趋势, 土地利用的优势度指数 D 却呈减少趋势, 说明陇南市各土地利用类型的面积分配更趋于多样化和平均化, 生态系统的复杂性和稳定性有所增强。

(2) 陇南市生态系统服务价值主要由林地和耕地支撑, 林地和耕地的生态系统服务价值占了总价值的 85.26%, 说明陇南市的生态系统服务价值体系的组成比较简单; 从生态系统服务价值变率角度来看, 林地的面积变化对生态系统服务价值的变化影响最大, 具有放大作用。

参考文献:

- [1] Jansen LJM, Di GA. Parametric land cover and land use classifications as tools for environmental change detection. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 91: 89–100
- [2] Semwal RL, Nautiyal S, Sen KK, Rana U, Maikhuri RK, Rao KS, Saxena KG. Patterns and ecological implications of agricultural land-use changes: A case study from central Himalaya, India. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 102: 81–92
- [3] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 孟庆华, 赵文武. 土地利用结构与生态过程. *第四纪研究*, 2003(3): 247–253
- [4] 白晓飞, 陈焕伟. 不同土地利用结构生态系统服务功能价值的变化研究——以内蒙古自治区伊金霍洛旗为例. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 180–182
- [5] 陈殊, 局为民, 李显凤. 常熟市土地利用变化对生态服务价值的影响. *水土保持研究*, 2009, 16(5): 93–97
- [6] 王成, 魏朝富, 邵景安, 高明, 蒋伟. 区域生态服务价值对土地利用变化的响应——以重庆市沙坪坝区为例. *应用生态学报*, 2006, 17(8): 1485–1489
- [7] 周飞, 陈士银, 钟来元, 刘敏超. 区域土地利用与生态服务价值变化研究——以广东省湛江市为例. *土壤*, 2008, 40(5): 847–851
- [8] 王伟林, 黄贤金, 钟太洋. 区域土地利用变化的生态系统服务价值响应. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 212–221
- [9] 万利, 陈佑启, 谭靖, 郭斌, 杨阿强. 土地利用变化对区域生态系统服务价值的影响——以北京为例. *地域研究与开发*, 2009, 28(4): 94–109
- [10] 王宗明, 张柏, 张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2004, 19(1): 55–61
- [11] 李金平, 王志石. 1983–2003 年澳门生态系统服务价值的变化. *生态环境*, 2004, 13(4): 605–607
- [12] 闵捷, 高魏, 李晓云, 张安录. 武汉市土地利用与生态系统服务价值的时空变化分析. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 170–174
- [13] 蔡邦成, 陆根法, 宋莉娟, 黄和平, 韩尚富, 陈克亮. 土地利用变化对昆山生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 3005–3010

- [14] 李加林, 童亿勤, 许继琴, 杨晓平. 杭州湾南岸生态系统服务功能及其经济价值研究. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 104-108
- [15] 周生路, 朱青, 赵其国. 近十几年来南京市土地利用结构变化特征研究. 土壤, 2005, 37(4): 394-399
- [16] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196
- [17] 肖玉, 谢高地, 安凯. 莽措湖流域生态系统服务功能价值变化研究. 应用生态学报, 2003, 14(5): 676-680
- [18] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919

Responses of Ecologically Fragile Areas of Yangtze River of Ecological Service Value to Land Use Change

——A Case Study of Longnan City, Gansu Province

LIU Ying-ying¹, SHI Pei-ji¹, LIU Ling², LIU Chun-yu¹, PAN Jing-hu¹, DANG Guo-feng¹

(¹ College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

² Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191, China)

Abstract: By using the data of land use survey of Longnan City from 2003 to 2008 and the methods of structural quantitative analysis of landscape ecology, this paper calculated the land use heterogeneity and ecological service value and analyzed the changes of land use structure and ecological service value as well as their relationship. The results showed that the indices of both diversity and evenness of land use increased but the dominance index of land use decreased. The ecological service value of forest land were highest in Longnan City, and the total ecological service value of land use increased from 2003 to 2008. There were linear correlations between the structure and ecological service value of land use ecosystem.

Key words: Land use structure, Ecological service value, Land use diversity, Longnan City