

基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析

唐秀美^{1,2} 刘玉^{1,2} 刘新卫³ 潘瑜春^{1,2} 吴彦澎⁴ 李虹^{1,2}

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 国土资源部土地整治中心, 北京 100035; 4. 北京市农林科学院, 北京 100097)

摘要: 以北京市海淀区为例, 在对区域土地利用现状进行划分的基础上, 基于格网尺度估算了区域生态系统服务价值, 并根据价值分布状况将区域划分为不同的生态系统服务价值分区, 基于 GIS 和 FRAGSTAS 软件, 分析了不同分区的土地利用结构和景观格局状况。结果表明: 海淀区格网的生态系统服务价值处于 -234.56 ~ 207.97 万元之间, 并呈现明显的从南部到西北部增加的趋势; 不同生态系统服务价值分区土地利用结构差距较大, 高值区的土地利用类型主要为城市绿地, 中值区土地利用类型面积较大的为耕地和城市绿地, 低值区建设用地的面积较大; 不同生态系统服务价值分区的景观格局指数变化较大, 从高值区到低值区, 景观格局的破碎化程度逐渐增加, 人类活动对生态环境的影响不断加剧, 人类活动对景观的干扰程度加大。研究结果可以为精细化评估区域生态系统服务价值提供参考, 并能服务于区域土地利用结构调整和可持续利用及生态景观建设。

关键词: 生态系统服务价值; 地理信息系统; 格网; 评估

中图分类号: F062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0149-05

Estimation and Analysis of Ecosystem Service Value Based on Grid Scale

TANG Xiumei^{1,2} LIU Yu^{1,2} LIU Xinwei³ PAN Yuchun^{1,2} WU Yanpeng⁴ LI Hong^{1,2}

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. Center of Land Consolidation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China

4. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: The regional ecosystem service value of Haidian District in Beijing was estimated in the 500 m × 500 m grid scale by using present regional land use data. The research area was divided into different types of sub-regions according to the distribution of ecosystem service values. The land use structure and landscape pattern of different sub-regions were analyzed through the software of GIS and FRAGSTAS. The results showed that the ecosystem service value of Haidian District was ranged from -2.35 million yuan to 2.08 million yuan, which was increased from the south to northwest. The land use structure and ecosystem service value were different in different sub-regions. The main land use types were urban green space in high value regions, cultivated land and forest land in mid value regions and construction land in low value regions. There were also large differences of landscape pattern index among different sub-regions of ecosystem service value. The fragmentation of the landscape pattern was gradually increased from low value regions to high value regions, indicating that the influence of human activities on the ecological environment was increased, and the disturbing of human activities on the landscape structure was also increased. The results of this research can provide a reference for the intensive evaluation of regional ecosystem service, and serve as a scientific basis for the structure adjustment, sustainable utilization of regional land and ecological landscape construction.

Key words: ecosystem service value; GIS; grid; evaluation

收稿日期: 2016-05-24 修回日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301093)、北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJX20170501)和2014年山东省高校人文社会科学科学研究计划项目(J14WF75)

作者简介: 唐秀美(1982—),女,副研究员,主要从事土地利用与土地信息技术研究,E-mail: Tangxm@nrcita.org.cn

通信作者: 刘新卫(1977—),男,研究员,主要从事土地可持续利用研究,E-mail: Liuxinwei@lrcr.org.cn

引言

生态系统服务是指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用^[1]。生态系统是生态服务与功能形成和维持的物质基础,区域生态系统自身和环境条件的多样性决定了生态服务功能类型和强度的空间差异^[2]。随着环境问题的恶化,利用生态系统服务价值定量评估土地利用引起的生态效应已成为研究热点^[3],国内外围绕生态系统服务内涵^[4]、类型划分^[5]及其价值评估方法^[6-7]等方面进行了探讨,对不同类型的生态系统服务价值进行了评估^[8-13],包括森林、草地、农田、湿地、河流、城市等。并在不同尺度^[14-19]进行了深入的研究。作为人类实践的基本活动,土地利用是人与自然交叉最密切的环节,对维持区域生态系统服务功能起着决定性作用^[5]。研究土地利用/覆盖变化对生态系统服务价值的影响,对促进区域生态建设和可持续发展具有现实意义^[20]。目前大部分研究是在对生态系统服务进行初步定义的基础上,依据土地变化、植被覆盖类型等信息进行供应能力价值估算^[21-23]。由于建设用地在城市分布较为广泛,且其对区域生态环境造成的影响较大,有研究者尝试探索对其价值进行估算^[24],但目前城市中建设用地类型较为复杂,将其估算为单一价值影响区域生态系统服务价值计算的科学性。基于以上分析,本文以海淀区为例,在对其土地利用类型,特别是建设用地类型进行细分的基础上,基于500 m × 500 m 格网尺度,对区域生态系统服务价值进行测算分析,并基于此对区域进行分区,研究不同分区的土地利用结构和景观格局特征,以期有目标地进行土地利用调整、科学合理促进生态景观建设和保护区域生态环境提供参考和依据。

1 研究区概况与数据来源

海淀区位于北京市区西北部,地理位置北纬39°53′~40°09′、东经116°03′~116°23′,东与西城区、朝阳区相邻,南与丰台区毗连,西与石景山区、门头沟区交界,北与昌平区接壤。南北长约30 km,东西最宽处29 km,面积426 km²。海淀内有平原和山地2种地形,地势有起伏,总体呈西高东低。从功能上来划分,海淀区属于北京市城市功能拓展区,是连接北京市区与城郊的一个过渡地区。在经济发展上,海淀区的东部和西部差异较大,东部临近北京市中心,城市化程度高,开发强度大,商业区、高新技术研发区大部分聚集于此;西部城市化程度较低,有大

面积的农业用地。

本研究数据来源于国产高分1号遥感影像数据,分辨率为2 m,经目视解译获取海淀区2014年土地利用现状数据,如图1所示,并通过现场调研进行地类核实,将土地利用类型划分为耕地、水域、城市绿地、未利用地 and 建设用地,其中,建设用地细分为居住用地、商业用地、工矿用地、公共服务用地和道路。

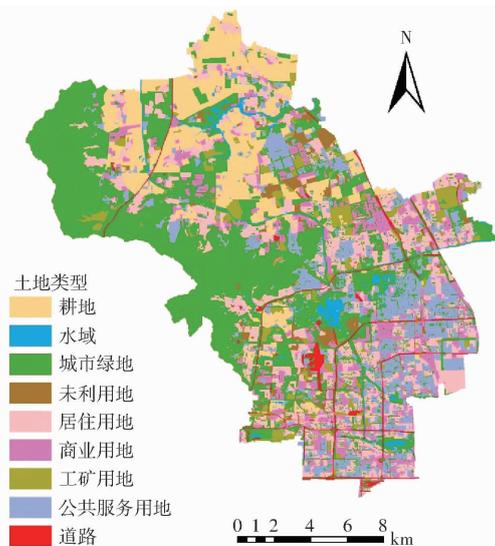


图1 海淀区土地利用类型分布图

Fig. 1 Land use types distribution of Haidian District

2 研究方法

2.1 研究思路

本研究基于国产高分1号遥感影像数据获取海淀区土地利用数据,结合已有研究,确定各土地利用类型的生态系统服务基准价值,特别是建设用地的基准价值;其次,将海淀区划分为500 m × 500 m 的格网,以格网为单元,测算每个格网的生态系统服务价值,分析海淀区生态系统服务价值空间分布状况;最后,根据海淀区的生态系统服务价值状况将海淀区划分为3个分区,并分析不同分区的土地利用结构特征和景观格局。

2.2 土地利用类型生态系统服务价值估算

对海淀区的土地利用现状类型进行综合分析,最终确定了9个土地利用现状用地类型,参照文献^[21, 24-27],确定了各个土地类型的生态系统服务基准价值,特别是各类型建设用地的生态系统服务基准价值,继而进行了空间尺度和时间尺度上的修正^[28],使之适合于北京的实际情况,最终得到北京市各土地利用类型单位面积生态系统服务基准价值,其中,城市绿地的生态系统服务价值取林地、水域和草地的平均值,如表1所示。

表1 海淀区土地利用类型的单位面积生态系统服务价值

Tab.1 Basic per unit area ecosystem service value of each land use type in Haidian District

元/hm²

用地类型	气体调节	气候调节	水源涵养	土壤形成与保护	废物处理	生物多样性保护	食物生产	原材料	娱乐文化	总价值
耕地	976.39	1 862.36	643.26	2 923.01	2 369.92	694.77	1 768.85	139.75	2 790.84	14 169.16
城市绿地	1 836.85	1 887.65	13 987.36	2 739.69	12 337.01	3 471.67	250.34	992.09	3 126.88	40 629.53
水域	0	828.57	36 709.38	18.01	32 746.64	4 485.10	180.12	18.01	7 817.40	82 803.23
未利用地	0	0	105.90	70.60	35.30	1 200.23	35.30	0	35.30	1 482.63
居住用地	-2 387.91	-2 831.48	-62 943.12	0	-14 804.41	416.86	0	0	625.38	-81 924.67
商业用地	-2 865.49	-3 397.77	-75 531.74	0	-16 284.85	173.69	0	0	2 188.82	-95 717.34
工矿用地	-1 576.02	-2 718.22	-18 882.94	0	-3 256.97	69.48	0	0	312.69	-26 051.97
公共服务用地	-630.41	-1 630.93	-11 329.76	0	-1 628.49	555.82	0	0	2 501.50	-12 162.26
道路	-1 432.74	-652.37	-2 265.95	0	-162.85	138.95	0	0	0	-4 374.96

基于500 m × 500 m 格网,根据表1的生态系统服务基准价值,计算海淀区格网尺度生态系统服务价值,结果如图2所示。海淀区共划分为1854个单元,各格网的生态系统服务价值处于-234.56~207.97万元之间,格网的生态系统服务价值呈现明显的从南部到西北部增加的趋势,其中,海淀区南部和中西部区域生态系统服务价值较低,多数格网的价值低于-100万元,中部和北部地区生态系统服务价值多数处于-100~0万元之间,少数格网处于0~100万元,西部的格网价值较高,多数格网的生态系统服务价值高于100万元。

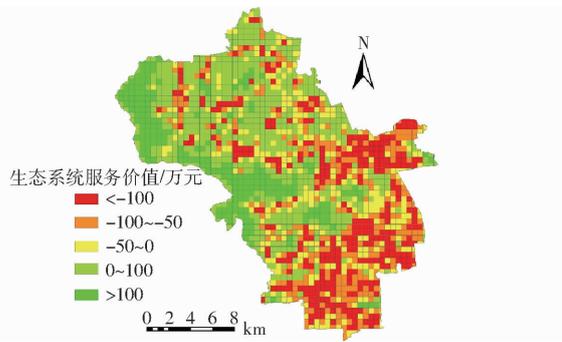


图2 海淀区500 m × 500 m 格网生态系统服务价值分布图
Fig.2 Ecosystem service value distribution in Haidian District based on 500 m × 500 m grid

2.3 土地利用分析

基于生态系统服务价值对海淀区格网进行聚类,将其聚类为3个生态系统服务价值分区,分别为高值区、中值区和低值区(图3),分析3个区域的土地利用结构和景观格局状况。从表2可看出,3个区域的土地利用结构差距较大,高值区的土地利用类型主要为城市绿地,其面积占65.74%,其次为耕地和居住用地,其他用地类型的比例较小;中值区土地利用类型面积较大的为耕地和城市绿地,其次是居住用地和公共服务用地,低值区占比较高的用地类型是建设用地,包括居住用地、公共服务用地和商业用地等,城市绿地的面积也较高。

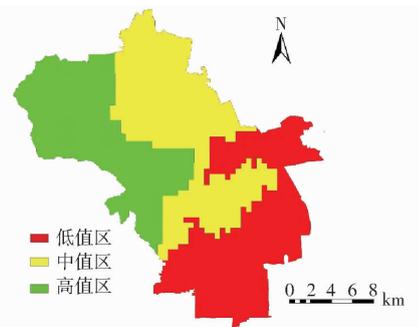


图3 海淀区生态系统服务价值分区图
Fig.3 Zoning map of ecosystem service value in Haidian District

表2 海淀区不同生态系统服务价值分区土地利用结构
Tab.2 Land use structure in different ecosystem service value divisions in Haidian District

土地类型	高值区		中值区		低值区	
	面积/ hm ²	百分比/ %	面积/ hm ²	百分比/ %	面积/ hm ²	百分比/ %
耕地	1 660.34	12.53	4 270.70	27.53	202.50	1.41
城市绿地	8 713.40	65.74	4 553.65	29.35	2 491.11	17.32
水域	81.25	0.61	711.88	4.59	208.21	1.45
未利用地	79.32	0.60	697.21	4.49	224.97	1.57
居住用地	1 226.26	9.25	1 795.19	11.57	4 026.81	28.00
商业用地	476.56	3.60	941.16	6.07	2 371.88	16.49
工矿用地	309.91	2.34	705.45	4.55	1 013.82	7.05
公共服务用地	638.21	4.81	1 668.66	10.76	3 269.55	22.74
道路	68.37	0.52	169.35	1.09	571.25	3.97
总和	13 253.62	100	15 513.25	100	14 380.10	100

2.4 景观格局分析

从表3中可以看出,不同生态系统服务价值分区景观格局指数的变化较大,其中,斑块密度从高值区到低值区逐渐增加,斑块密度反映了景观的破碎化程度,斑块密度逐步增加,说明从高值区到低值区,景观格局的破碎化程度逐渐增加,人类活动对生态环境的影响不断加剧,人类活动对景观的干扰程

表3 海淀区不同生态系统服务价值分区景观格局指数

Tab.3 Total eigenvalue of landscape patterns in different ecosystem service value divisions in Haidian District

参数	高值区	中值区	低值区
景观总面积/hm ²	14 358.43	15 506.83	13 235.95
斑块数量	396	1 248	1 877
斑块密度	2.988 1	8.052 8	13.078 4
最大斑块指数	61.199 4	11.583 7	4.209 7
平均分维数	1.049 8	1.046 7	1.045 2
景观破碎化指数	2.612 5	34.986 4	172.622 4
景观多样性指数	1.195 4	1.846 7	1.800 2
景观聚集度指数	88.620 1	78.219 7	70.642 0
景观均匀度指数	0.544 1	0.840 5	0.819 3
景观优势度指数	1.001 8	0.350 5	0.397 0

度加大;平均分维数差距不大,平均分维数意味着斑块的自相似程度,从一定程度上反映了人类活动对斑块的影响程度,平均分维数越小说明斑块形状相似性越小,形状越不规则,3个分区的景观平均分维数都在1.04左右,说明3个分区的景观形状都较为不规则;景观破碎化指数从高值区到低值区持续增加,景观破碎化表征景观被分割的破碎程度,反映景观空间结构的复杂性,低值区的景观破碎化程度最高,说明人类活动在低值区对景观的影响最大;景观

多样性指数高值区最低,中值区最高,低值区也较高,景观均匀度指数与景观多样性指数的特征相似,说明中值区的景观最多样且分布最均匀;而景观聚集度指数和优势度指数都是高值区最高,特别是优势度指数明显高于中值区和低值区,说明高值区的景观类型中,某种景观占优势地位且分布比较聚集,而中值区和低值区某一种或几种景观组分占优势的情况比较小,景观整体结构受人类活动影响较大。

3 结束语

以北京市海淀区为例,对区域土地利用现状进行分析,特别对建设用地类型进行了细分,划分为居住用地、商业用地、工矿用地、公共服务用地和道路,并结合已有研究,确定了不同土地利用类型的生态系统服务基准价值,同时,基于500 m × 500 m的网格估算了区域生态系统服务价值,在分析区域生态系统服务价值空间结构的基础上,将区域划分为不同的生态系统服务价值分区,并分析了不同分区的土地利用结构和景观格局状况。探索了建设用地生态系统服务价值的赋值方法,对于全面认识区域的生态系统服务价值具有实际意义,研究结果可以为精细化评估区域生态系统服务价值做参考,并能服务于区域土地利用结构调整和可持续利用及生态景观建设。

参 考 文 献

- 1 DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- 2 谢高地,肖玉,鲁春霞. 生态系统服务研究:进展、局限和基本范式[J]. 植物生态学报,2006,30(2):191-199.
XIE Gaodi, XIAO Yu, LU Chunxia. Study on ecosystem services: progress, limitation and basic paradigm[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(2):191-199. (in Chinese)
- 3 严恩萍,林辉,王广兴,等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. 生态学报,2014, 34(20):5962-5973.
YAN Enping, LIN Hui, WANG Guangxing, et al. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir region during 1990—2011[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5962-5973. (in Chinese)
- 4 TURNER R. Valuing nature: lessons learned and future research directions [J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 493-510.
- 5 COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630):253-260.
- 6 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报,2000,45(1):17-22.
CHEN Zhongxin, ZHANG Xinshi. The value of the ecosystem benefit in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1):17-22. (in Chinese)
- 7 高玲,赵智杰,张浩,等. 基于生境质量与生态区位的海口市生态系统服务价值估算[J]. 北京大学学报:自然科学版,2012, 48(5):833-840.
GAO Ling, ZHAO Zhijie, ZHANG Hao, et al. Adjustment of Haikou City ecosystem services value based on habitat quality and ecological location [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(5):833-840. (in Chinese)
- 8 王玉涛,郭卫华,刘建,等. 昆崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报,2009,29(1):523-531.
WANG Yutao, GUO Weihua, LIU Jian, et al. Value of ecosystem services of Kunyu Mountain Natural Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 523-531. (in Chinese)
- 9 于格,鲁春霞,谢高地,等. 青藏高原草地生态系统服务功能的季节动态变化[J]. 应用生态学报,2007, 18(1): 47-51.
YU Ge, LU Chunxia, XIE Gaodi, et al. Seasonal dynamics of ecosystem services of grassland in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1): 47-51. (in Chinese)
- 10 孙新章,周海林,谢高地. 中国农田生态系统的服务功能及其经济价值[J]. 中国人口资源与环境,2007, 17(4): 55-60.
SUN Xinzhang, ZHOU Hailin, XIE Gaodi. Ecological services and their values of Chinese agroecosystem [J]. China Population, Resources and Environment, 2007, 17(4): 55-60. (in Chinese)

- 11 白雪,马克明,杨柳,等.三江平原湿地保护区内外的生态功能差异[J].生态学报,2008,28(2):620-626.
BAI Xue, MA Keming, YANG Liu, et al. Ecological function differences inside and outside the wetland nature reserves in Sanjiang Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 620-626. (in Chinese)
- 12 全为民,张锦平,平仙隐,等.巨牡蛎对长江口环境的净化功能及其生态系统服务价值[J].应用生态学报,2007,18(4):871-876.
QUAN Weimin, ZHANG Jinping, PING Xianyin, et al. Purification function and ecological services value of *Crassostrea sp.* in Yangtze River estuary [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 871-876. (in Chinese)
- 13 李文楷,李天宏,钱征寒.深圳市土地利用变化对生态系统服务功能的影响[J].自然资源学报,2008,23(3):440-446.
LI Wenkai, LI Tianhong, QIAN Zhenghan. Impact of land use change on ecosystem service values in Shenzhen [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 440-446. (in Chinese)
- 14 COSTANZA R, VOINOV A, BOUMANS R, et al. Integrated ecological economic modeling of the Patuxent River Watershed, Maryland [J]. Ecological Monographs, 2002, 72(2): 203-231.
- 15 谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展[J].资源科学,2001,23(6):5-9.
XIE GaoDi, LU Chunxia, CHENG Shengkui. Progress in evaluating the global ecosystem services [J]. Resources Science, 2001, 23(6): 5-9. (in Chinese)
- 16 毕晓丽,葛剑平.基于IGBP土地覆盖类型的中国陆地生态系统服务功能价值评估[J].山地学报,2004,22(1):48-53.
BI Xiaoli, GE Jianping. Evaluating ecosystem service valuation in China based on the IGBP land cover datasets [J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(1): 48-53. (in Chinese)
- 17 李锋,叶亚平,宋博文,等.城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变—以常州市为例[J].生态学报,2011,31(19):5623-5631.
LI Feng, YE Yaping, SONG Bowen, et al. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a case study in Changzhou City, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5623-5631. (in Chinese)
- 18 张晓云,吕宪国,沈松平.若尔盖高原湿地生态系统服务价值动态[J].应用生态学报,2009,20(5):1147-1152.
ZHANG Xiaoyun, LÜ Xianguo, SHEN Songping. Dynamic changes of Ruergai Plateau wetland ecosystem service value [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1147-1152. (in Chinese)
- 19 闵庆文,谢高地,胡聃,等.青海草地生态系统服务功能的价值评估[J].资源科学,2004,26(3):56-60.
MIN Qingwen, XIE GaoDi, HU Dan, et al. Service valuation of grassland ecosystem in Qinghai Province [J]. Resources Science, 2004, 26(3): 56-60. (in Chinese)
- 20 刘金勇,孔繁花,尹海伟,等.济南市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1231-1236.
LIU Jinyong, KONG Fanhua, YIN Haiwei, et al. Land use change and its effects on ecosystem services value in Ji'nan City of Shandong Province, East China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1231-1236. (in Chinese)
- 21 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
XIE GaoDi, ZHANG Yili, LU Chunxia, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 47-53. (in Chinese)
- 22 张明阳,王克林,刘会玉,等.喀斯特生态系统服务价值时空分异及其与环境因子的关系[J].中国生态农业学报,2010,18(1):189-197.
ZHANG Mingyang, WANG Kelin, LIU Huiyu, et al. Spatio-temporal variation of karst ecosystem service value and its correlation with ambient environmental factors [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 189-197. (in Chinese)
- 23 郭荣中,杨敏华.长株潭地区生态系统服务价值分析及趋势预测[J].农业工程学报,2014,30(5):238-246.
GUO Rongzhong, YANG Minhua. Ecosystem service value analysis and trend prediction in Chang-Zhu-Tan region [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 238-246. (in Chinese)
- 24 李晓赛,朱永明,赵丽,等.基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J].中国生态农业学报,2015,23(3):373-381.
LI Xiaosai, ZHU Yongming, ZHAO Li, et al. Ecosystem services value change in Qinglong County from dynamically adjusted value coefficients [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 373-381. (in Chinese)
- 25 马凤.上海临港新城开发对土地利用及生态系统服务价值的影响研究[D].上海:华东师范大学,2012.
MA Feng. Impacts of Lingang New City, Shanghai on the land use and ecosystem services value in the exploitation [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012. (in Chinese)
- 26 邓舒洪.区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究[D].杭州:浙江大学,2012.
DENG Hongshu. Dynamic effects on ecosystem services value with regional land use change [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- 27 唐秀美,郝星耀,刘玉,等.生态系统服务价值驱动因素与空间异质性分析[J/OL].农业机械学报,2016,47(5):336-342. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160546&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.046.
TANG Xiumei, HAO Xingyao, LIU Yu, et al. Driving factors and spatial heterogeneity analysis of ecosystem services value [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 336-342. (in Chinese)

- ZHAO Chunlei, SHAO Ming'an, JIA Xiaoxu. Distribution and simulation of saturated soil hydraulic conductivity at a slope of northern Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(6):806-815. (in Chinese)
- 15 杨勤业, 张伯平, 郑度. 关于黄土高原空间范围的讨论[J]. *自然资源学报*, 1988, 3(1):9-15.
YANG Qinye, ZHANG Boping, ZHENG Du. On the boundary of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 1988, 3(1):9-15. (in Chinese)
- 16 JIA X, SHAO M, ZHANG C, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528:152-160.
- 17 王云强, 邵明安. 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院, 2010.
WANG Yunqiang, SHAO Ming'an. Spatial distribution and influence factors of dried soil layers across the Loess Plateau[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- 18 FLATMAN G T, YFANTIS A A. Geostatistical strategies for soil sampling: the survey and the census [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1984, 4(4):335-349.
- 19 ZHAO C, SHAO M, JIA X, et al. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China[J]. *CATENA*, 2016, 143:1-6.
- 20 WENDROTH O, REUTER H I, CHRISTIAN K K. Predicting yield of barley across a landscape: a state-space modeling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1):250-263.
- 21 TIMM L C, REICHARDT K, OLIVEIRA J C M, et al. State-space approach for evaluating the soil-plant-atmosphere system [R]. Lectures Given at the College on Soil Physics Trieste, 2003:387-428.
- 22 SHUMWAY R H, STOFFER D S. An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm[J]. *Journal of Time Series Analysis*, 1982, 3(4):253-264.
- 23 WENDROTH O, JURSCHIK P, KERSEBAUM K C, et al. Identifying, understanding, and describing spatial processes in agricultural landscapes—four case studies[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, 58(3-4):113-127.
- 24 WANG Y, SHAO M, LIU Z, et al. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China[J]. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(2):311-330.
- 25 BENITES V M, MACHADO P L O A, FIDALGO E C C, et al. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil[J]. *Geoderma*, 2007, 139(1-2):90-97.
- 26 ZHAO C, SHAO M, JIA X, et al. Particle size distribution of soils (0~500 cm) in the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma Regional*, 2016, 7(3):251-258.
- 27 KAUR R, KUMAR S, GURUNG H P. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(5):847-858.
- 28 JIA X, SHAO M, WEI X, et al. Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space modeling approach in a small catchment on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2011, 160(3-4):281-291.

(上接第153页)

- 28 李虹, 唐秀美, 赵春江, 等. 基于力矩平衡点法的北京市生态系统服务价值时空分布[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11):151-156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151121&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.021
LI Hong, TANG Xiumei, ZHAO Chunjiang, et al. Temporal and spatial distribution of ecosystem service value in Beijing based on torque balance point method [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):151-156. (in Chinese)
- 29 岳德鹏, 于强, 张启斌, 等. 区域生态安全格局优化研究进展[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2):1-10. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170201&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.001.
YUE Depeng, YU Qiang, ZHANG Qibin, et al. Progress in research on regional ecological security pattern optimization [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2):1-10. (in Chinese)
- 30 于强, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于 BCBS 模型的生态节点布局优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12):330-336, 329. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016124/&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.041.
YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Layout optimization of ecological nodes based on BCBS model [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):330-336, 329. (in Chinese)
- 31 郭荣中, 杨敏华, 申海建. 长株潭地区耕地生态安全评价研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10):193-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161025&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.025.
GUO Rongzhong, YANG Minhua, SHEN Haijian. Evaluation for ecological security of cultivated land in Chang-Zhu-Tan region [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10):193-201. (in Chinese)