

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

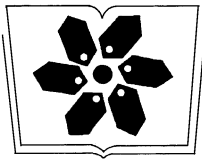
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 21 期 Vol.32 No.21 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 21 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目次

白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响.....	王衫允,祝贵兵,曲冬梅,等 (6591)
造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应.....	夏孟婧,苗颖,陆兆华,等 (6599)
图们江下游湿地生态系统健康评价.....	朱卫红,郭艳丽,孙鹏,等 (6609)
适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法.....	陈展,林波,尚鹤,等 (6619)
基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应.....	梁婕,蔡青,郭生练,等 (6628)
崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性.....	章振亚,丁陈利,肖明 (6636)
中国东部亚热带地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的谐波分析.....	赵兴云,李宝惠,王建,等 (6647)
甘肃臭草型退化草地优势种群空间格局及其关联性.....	高福元,赵成章 (6661)
川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应.....	谭波,吴福忠,杨万勤,等 (6670)
模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响.....	邓华卫,布仁仓,刘晓梅,等 (6679)
苹果三维树冠的净光合速率分布模拟.....	高照全,赵晨霞,张显川,等 (6688)
拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响.....	郝玉敏,戴传超,戴志东,等 (6695)
落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系.....	苏冬雪,王文杰,邱岭,等 (6705)
人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究.....	张永宽,陶冶,刘会良,等 (6715)
山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.....	王强,袁兴中,刘红 (6726)
荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系.....	吴忠鑫,张磊,张秀梅,等 (6737)
北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化.....	杨青,王真良,樊景凤,等 (6747)
鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.....	蒙古军,朱利凯,杨倩,等 (6755)
村落文化林与非文化林多尺度物种多样性加性分配.....	高虹,陈圣宾,欧阳志云 (6767)
不同生计方式农户的环境感知——以甘南高原为例.....	赵雪雁 (6776)
两种预测模型在地下水动态中的比较与应用.....	张霞,李占斌,张振文,等 (6788)
四川黄龙沟少花鹤顶兰繁殖成功特征.....	黄宝强,寇勇,安德军 (6795)
硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响.....	杨扬,孟德龙,秦红灵,等 (6803)
新疆两典型微咸水湖水体免培养古菌多样性.....	邓丽娟,娄恺,曾军,等 (6811)
白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性.....	赵玉娟,李凤超,张强,等 (6819)
双酚 A 对萼花臂尾轮虫毒性及生活史的影响.....	陆正和,赵宝坤,杨家新 (6828)
孵化温度对双斑锦蛇初生幼体行为和呼吸代谢的影响.....	曹梦洁,祝思,蔡若茹,等 (6836)
黄玛草蛉捕食米蛾卵的功能反应与数值反应.....	李水泉,黄寿山,韩诗畴,等 (6842)
互惠-寄生耦合系统的稳定性.....	高磊,杨燕,贺军州,等 (6848)
超微七味白术散对肠道微生物及酶活性的影响.....	谭周进,吴海,刘富林,等 (6856)
专论与综述	
氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响.....	陈浩,莫江明,张炜,等 (6864)
全球 CO_2 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展.....	赵旭辉,孔繁翔,谢薇薇,等 (6880)
跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段.....	石龙宇,李杜,陈蕾,等 (6892)
研究简报	
会同和朱亭 11 年生杉木林能量积累与分配.....	康文星,熊振湘,何介南,等 (6901)
退化草地阿尔泰针茅生殖株丛与非生殖株丛的空间格局.....	任珩,赵成章,高福元,等 (6909)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 35 * 2012-11



封面图说: 白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊湿地。淀区内沟壕纵横交织错落,村庄、苇地、园田星罗棋布,在水文、水化学、生物地球化学循环以及生物多样性等方面,具有非常复杂的异质性。随着上游城镇污废水、农田径流进入水域,淀区富营养化日益加剧。复杂的水环境特点、高度的景观异质性和良好的生物多样性,使得该地区成为探索规模性厌氧氨氧化反应的良好研究地点(详见本期第 6591—6598 页)。

彩图提供: 王为东博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: wdwangh@yahoo.com

DOI: 10.5846/stxb201109201384

蒙古军, 朱利凯, 杨倩, 毛熙彦. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766.

Meng J J, Zhu L K, Yang Q, Mao X Y. Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6755-6766.

鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建

蒙古军*, 朱利凯, 杨倩, 毛熙彦

(北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:合理构建区域土地利用生态安全格局来实施管理对策和改善区域生态安全水平, 已经成为区域生态环境保护的新需求。以位于中国北方农牧交错区的鄂尔多斯市为研究区, 基于自然地理数据、社会经济统计数据、土地利用/覆被数据等, 借助多目标优化模型和 GIS 空间分析技术, 构建了鄂尔多斯市土地利用生态安全格局, 结果表明: (1) 不适宜性耕地所占比重较大, 林地和草地分布比较合理, 适宜的未利用地面积所占比重较大, 后备土地资源丰富; (2) 多目标优化结果显示, 耕地、林地、水域和建设用地面积呈现增加的趋势; 草地面积基本保持不变; 未利用地面积大幅度下降; (3) 土地利用生态安全格局显示, 耕地面积增加, 主要分布在水分条件较好的河流、湖泊和水库等的周边地区以及城镇和乡村居民点周围; 林地面积大幅度增加, 主要分布在达拉特旗北部和准格尔旗东部; 草地略有增加, 广泛分布于库布齐沙漠和毛乌素沙地以外的地区; 建设用地增加面积主要来自重点发展城镇的扩展和规划的重点矿产资源开采区; 未利用地大幅度减少, 主要集中在杭锦旗境内的库布齐沙漠以及乌审旗和鄂托克旗境内的毛乌素沙地。研究结果对鄂尔多斯市土地资源管理和生态安全建设具有重要指导意义。

关键词:土地利用; 生态适宜性; 多目标优化模型; 生态安全格局; 鄂尔多斯市

Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China

MENG Jijun*, ZHU Likai, YANG Qian, MAO Xiyan

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: To improve ecological security level, reasonably building regional ecological security pattern based on land use has been the requirement for eco-environmental protection. Ordos, a typical farming-grazing transitional region in the northern part of China and also an ecological vulnerable and sensitive area, confronts a sharp conflict between its vulnerable ecological environment and its social and economic development. Taking Ordos as the study area and using physical geography data, socio-economic statistical data and land use/cover data, this paper built ecological security pattern based on land ecological suitability assessment with the multi-objective optimization model and spatial analysis technology. First, slope, soil type, gein, water resources and soil erosiveness are chosen as diagnostic indices for evaluation criterion. The method of lowest restrict factor is used to assess the land eco-suitability for three kinds of land use types, which are cultivated land, woodland and grassland. The results are presented as follows: unsuitable cultivated land accounts for a large proportion. The distribution of woodland and grassland are relatively reasonable. The proportion of the area of appropriate unused land is relatively large, which acts as the important potential land resources. Secondly, the results derived from the multi-objective optimization with two objective functions: ecological security and economic security, and some constrains such as land resources quantity and the demand for it, the water resource and soil erosion. It suggested that compared with

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40871048)

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jijunm@pku.edu.cn

the land use in 2008, the area of cultivated land, woodland, water, construction land showed an increasing trend, the area of grassland changed little, while the unused area decreased significantly in 2015. Thirdly, based on the multi-objective optimization, land ecological suitability assessment, land ecological security evaluation results and the city and mineral resources general plan, the ecological security pattern is built following the land use type adjustment principles under both ecological security and economic security scenarios. The adjustment results of cultivated land, ecological land (woodland and grassland) and natural reserve (unused land) under ecological security scenario showed that the cultivated land expands, mainly distributing along the rivers, lakes and reservoirs where the water conditions are favorable and at the peripheries of towns and villages. Woodland, whose area increased significantly, is mainly distributed in the northern part of Dalad Banner and the eastern part of Jungar Banner. The grassland, the dominant land-cover type, increases slightly, and it covers almost the whole study area except Kubuqi Desert and Mu Us Sandland (sparsely distributed among the two deserts). Unused land lessens in large amounts, and it is mainly distributed in Kubuqi Desert located in Hanggin Banner and Mu Us Sandland situated in Uxin Banner and Otog Banner. The adjustment results of construction land and mining area under economic security scenario mainly reflected in the increase in construction land which mainly derives from the expansion of key developing towns and the expansion of encouraging mining areas, Taking both the quantity optimization and spatial configuration into account makes the results more close to reality and bears great implications to land resources management and ecological security improvement. All findings would be useful for the researchers and local authorities, allowing it to be used as a reference for the study of land use planning or supporting land resources management.

Key Words: land use; ecological suitability; multi-objective optimization; ecological security pattern; Ordos

近几十年,随着全球人地矛盾的日趋尖锐,人们越来越重视土地资源的生态效益,通过构建区域土地利用生态安全格局来改善区域生态安全状况成为国内外研究的热点^[1-2]。土地利用生态安全格局是针对区域生态环境问题,以生态、社会和经济效益最优为目标,对区域内的各种自然和人文因素进行设计、组合与布局,得到由点、线、面、网组成的多目标、多层次、多类别的空间配置方案,以维持生态系统结构和过程的完整性,实现土地资源可持续利用^[3]。土地利用生态安全格局构建能够将生态系统管理对策落实到空间地域上,成为解决干旱区诸如水土流失、荒漠化等生态环境问题的重要途径^[4]。

目前,区域生态安全格局优化的理论和方法尚处在探索阶段^[5]。欧美学者主要从土地利用优化配置^[6-7]和景观生态规划^[8-9]两种途径进行相关研究,实质都是通过优化景观生态格局来构建区域生态安全格局。一般来说,景观格局优化就是在综合理解景观格局、功能和生态过程相互作用的基础上,通过调整优化各种景观类型在空间上和数量上的分布格局,使其产生最大景观生态效益,实现区域可持续发展^[10]。近年来,在土地生态适宜性和区域土地利用限制条件分析的基础上进行线性宏观规划成了景观格局优化的主要思路。景观格局优化主要包括数量结构优化、空间格局优化和综合优化^[3]。其中,数量结构优化的方法如最优化技术法^[11]和系统动力学模型^[12]等;空间格局优化如基于区域经济空间结构理论的土地利用格局优化模型^[13]、基于生态学理论的景观格局优化模型^[14-15]和元胞自动机模型^[16]等;综合优化以 CLUE-S 模型^[17]和集成模型^[18-19]具有代表性。由于土地利用生态安全格局的构建内容涉及多学科、多尺度和多层次的特点,加之目标的多元性和综合性,现有的模型方法在解决特定问题上均具有一定的局限性,因此,多种模型的集成成为一条有效途径。

鄂尔多斯市位于温带草原与荒漠的过渡地带,属于典型的农牧交错区。近年来,一方面自然资源富集,经济飞速发展;另一方面,由于各种自然和人文要素具有过渡和波动的特点,生态环境具有脆弱性和敏感性,表现为沙漠化加剧,可利用土地锐减;草地退化严重,承载力急剧下降;生态环境敏感,自然灾害频繁^[20-24]。脆弱的生态环境与快速发展的社会经济之间的矛盾日益尖锐。土地利用生态安全格局的构建能够有效协调经济发展和环境保护之间的矛盾,在保护环境的同时实现经济效益的最大化。本文综合水土资源、土地产品需

求、社会经济发展条件、未来发展目标和当前生态环境问题约束等条件,以生态和社会效益最大化为目标,借助多目标优化模型实现研究区土地数量结构优化;其次,基于土地数量结构优化结果、土地生态适宜性评价、土地利用生态安全评价和区域相关规划成果等,构建了研究区土地利用生态安全格局。研究集成了不同方法的优点,既考虑了数量优化,又考虑了空间配置,使结果更加贴近现实。本研究不仅能为鄂尔多斯市土地资源和生态系统管理提供科学依据,而且其政策启示对其他干旱区和生态脆弱区具有指导意义。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区

鄂尔多斯市是我国半干旱地区一个相对独立的自然地理单元^[25],位于黄河与长城的环抱之中,地理坐标为 106°42′—111°27′E、37°35′—40°51′N。属典型的温带大陆性气候,年降水量仅为 170—350 mm,年蒸发力高达 2000—3000 mm。地形西高东低,平均海拔在 1000—1500m 之间,西部为波状高原区,属典型的荒漠草原,东部为丘陵沟壑水土流失区和砒砂岩裸露区,北部为黄河冲积平原,中部为毛乌素沙地和库布其沙漠,总面积为 8.67 万 km²^[26]。境内自然资源富集,煤炭探明储量约占全国的 1/6,天然气探明储量约占全国的 1/3,羊绒制品产量约占全国的 1/3,素有“地下煤海”、“世界羊绒产业中心”等美誉。近年来,鄂尔多斯市与黄河北岸的呼和浩特市、包头市形成了内蒙经济发展最为活跃的“金三角”。

1.2 数据来源

土地覆被数据基于 2008 年 Landsat TM5 遥感影像。在实地调研中利用 GPS 定点并建立各种土地利用类型的解译标志,在 ERDAS 8.3 软件平台下对影像进行几何校正并参考解译标志对 2008 年影像进行人机交互式目视解译。借助野外采样点、植被类型图、地形图、1988 年和 2000 年土地利用矢量数据等来选择随机样点,并与相应的分类结果进行比较,分类精度达到标准(大于 70%)。另外,还有鄂尔多斯植被类型图(1:100 万)^[26]、土壤类型分布图和土壤侵蚀类型图(1:100 万)^[27];DEM 数据来自美国马里兰大学全球土地覆被数据库(分辨率为 90 m×90 m);鄂尔多斯 1960—2007 年气象数据来自国家气象局;水文水资源数据来自鄂尔多斯市 2008 年水资源公报和《伊克昭盟志》(第一册)^[26]。社会经济统计数据来自鄂尔多斯市统计年鉴(1978—2008);此外,还有来源于鄂尔多斯市国土局、林业局、农牧业局及环保局的相关资料。

2 土地生态适宜性评价

土地类型满足土地利用方式生态要求的程度称为土地生态适宜性^[28]。土地生态适宜性评价是土地利用优化配置空间定位的前提。自 FAO 于 1976 年颁布《土地评价纲要》以来,土地适宜性评价不断向精确化、综合化和动态化的方向发展,GIS 多目标决策和人工智能建模等技术方法得到广泛运用^[29-30]。

2.1 土地利用类型与评价系统

根据研究区土地利用状况,选择耕地、林地和草地 3 种用地类型。评价系统采用土地适宜类、土地适宜等和土地限制型三级制。将土地分为 3 个适宜类:宜耕、宜林和宜草;依据适宜性程度分为 4 等,即高度适宜、中度适宜、临界适宜和不适宜;在土地适宜等内按其限制因素和限制等级来进一步划分土地限制型。选取坡度、土壤类型、土壤有机质、水资源和土壤侵蚀性 5 个因子作为诊断指标建立评价标准(表 1)。

表 1 坡度指标的分级标准
Table 1 The ranks of slope index

限制因素 Limiting factor	分级标准 Grading standard/(°)	适宜等 Suitability grades		
		宜耕地 Cultivated land	宜林地 Woodland	宜草地 Grassland
坡度 Slope	<7	高度适宜	高度适宜	高度适宜
	7—15	中度适宜	高度适宜	高度适宜
	15—25	临界适宜	中度适宜	中度适宜
	25—30	不适宜	中度适宜	临界适宜
	>30	不适宜	临界适宜	不适宜

2.2 评价流程

土地评价常见的方法有经验法、限制因子法和综合指数法等^[28]。本文采用限制因子法来对各评价因子进行综合。具体过程如下:① 将各评价因子图层转化为 30 m×30 m 栅格,以栅格为基本单元分别针对耕地、林地和草地进行适宜性评价;② 将坡度、土壤类型和土壤有机质含量图层进行叠加,以每一图层对应栅格的最大值作为各种用地类型的适宜性等级,“1”表示高度适宜,“2”表示中度适宜,“3”表示临界适宜,“4”表示不适宜;③ 水资源是干旱区农业用地的主要限制条件,距离水源近的地方往往具有发展农牧业的优良条件。借助 Arc GIS,在初始评价结果的基础上将距离河流、淡水湖泊和水库小于 2000 m 的区域设置为高度适宜的耕地、林地和草地。④ 将上述评价结果与土壤侵蚀图层叠加,如果土壤侵蚀因子对某种土地利用类型不适宜,则该栅格设定为不适宜;如果土壤侵蚀因子对某种土地利用类型适宜,则该栅格保持原评价结果不变。

2.3 结果与分析

评价结果如图 1。可以看出,高度适宜和中度适宜的耕地分别占研究区总面积的 24.95% 和 1.95%,主要分布在沿黄河冲积平原、无定河流域以及准格尔旗、达拉特旗、东胜区、伊金霍洛旗等水分条件好的沟谷阶地,具有较好的排灌条件,较深厚的土层和较高的肥力水平。高度适宜和中度适宜的林地分别占研究区总面积的 30.00% 和 20.41%,主要分布在沿黄河冲积平原的沙化土地带和鄂尔多斯高原地区的沟谷或坡地以及毛乌素沙地和库布齐沙漠中的甸子地上,具有一定的水分条件,土层比较深厚,肥力水平一般。高度适宜和中度适宜的草地分别占研究区总面积的 33.17% 和 38.21%,主要分布在鄂尔多斯市波状高原、丘陵沟壑以及沿黄河平原区。

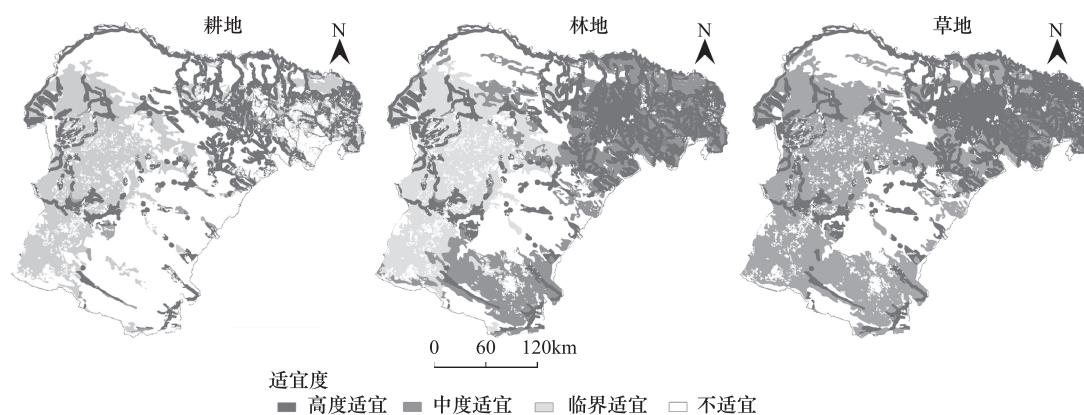


图 1 鄂尔多斯市 2008 年耕地、林地、草地生态适宜性评价图

Fig. 1 Ecological suitability map of cultivated land, woodland and grassland of Ordos in 2008

将高度适宜和中度适宜的图斑视为土地利用合理,临界适宜和不适宜的图斑视为土地利用不合理,据此判断 2008 年土地利用的合理性。2008 年耕地面积为 2692.84 km²,占总面积的 3.15%。其中,56.13% 利用合理,43.87% 利用不合理的部分应当进行调整。林地面积为 3789.80 km²,占总面积的 4.48%。其中,77.91% 为高度和中度适宜,分布较为合理。草地总面积为 55988.88 km²,占总面积的 65.38%。其中,78.91% 的草地利用较合理。未利用地总面积为 20894.25 km²,占总面积的 24.46%。其中,适宜性土地占 45.48%,是研究区重要的后备土地资源。

3 土地利用数量结构优化

土地利用数量结构优化是为了实现一定的社会、经济和生态目标最优化,根据政策法律、计划规划和土地供需等,利用一定的管理手段和技术,对区域土地资源进行利用方式、数量结构和综合效益等的优化,以不断提高土地系统的功能^[31]。多目标优化模型是常用的方法。

3.1 多目标优化

3.1.1 决策变量

根据研究目标、研究区现状及数据可获取情况,选取耕地(x_1)、林地(x_2)、草地(x_3);水域(x_4)、建设用

地(x_5)和未利用地(x_6)6个变量作为决策变量。

3.1.3 目标函数

(1) 经济发展目标

利用有限的土地资源尽可能生产较多产品和提供更多服务是数量结构优化的主要目标。经济发展目标可表示为:

$$f_1 = \max(LAP) \quad (1)$$

$$LAP = \sum_{i=1}^6 c_i x_i \quad (2)$$

式中, LAP 为研究区各种土地利用类型的经济总产值; c_i 为第*i*类土地利用类型的单位产值系数, x_i 为用地类型。不同土地利用类型单位面积经济产值存在差异。产值系数通过2008年工业和农林牧渔总产值与相应用地面积的比值来计算,考虑到模型计算的需要,未利用地的系数取值为1。经济产值目标函数可表示为:

$$f_1 = 121.5x_1 + 7.6x_2 + 5.8x_3 + 2.2x_4 + 6413.3x_5 + x_6 \quad (3)$$

(2) 生态安全目标

区域生态安全是指在一定时空范围内,土地系统能够保持其结构和功能不受威胁或者少受威胁的健康状态,并能够为人类社会经济可持续发展提供产品和服务,从而维持土地系统的长期协调发展^[32]。生态安全目标要求研究区生态安全指数达到最大,目标函数可表示为:

$$f_2 = \max(TESI) \quad (4)$$

$$TESI = \sum_{i=1}^6 ESI_i x_i \quad (5)$$

式中, $TESI$ 表示区域各种土地利用类型的生态安全指数总和; ESI_i 表示研究区不同土地利用类型的平均生态安全指数,基于蒙吉军等的评价结果^[32]。生态安全目标函数可表示为:

$$f_2 = 59.7x_1 + 64.3x_2 + 65.5x_3 + 66.3x_4 + 61.9x_5 + 62.1x_6 \quad (6)$$

3.1.3 约束条件

(1) 总面积约束和非负约束

研究区6个决策变量总和为86752 km²,且各决策变量的取值大于零。

(2) 耕地(x_1)约束

采用最小人均耕地面积确定未来耕地的最低需求量^[33]。研究区最小人均耕地面积为0.1922 hm²。对研究区1978—2009年人口进行自相关分析,建立一阶自回归模型,预测得到2015年人口数量为161.927万,计算出2015年耕地的最低需求量为3112.97 km²。另外,根据土地生态适宜性评价结果,耕地总面积不超过宜耕性为中、高度适宜的耕地面积和宜耕性为高度适宜的未利用地面积之和(4888.15 km²)。

(3) 林地(x_2)约束

研究区是我国沙漠化和水土流失较为严重的地区之一。2015年林地面积大于现状林地面积(3888.14 km²)。根据林地生态适宜性评价结果,林地面积应小于现状林地与宜林性为高度和中度适宜的未利用地面积之和(8674.60 km²)。

(4) 草地(x_3)约束

根据2002年草地资源调查数据,暖季羊单位需草量为14.21×666.7m²/羊单位^①。通过研究区牛羊肉总产量、肉类消费量及人口预测,2015年牧草需求面积应大于25566.95 km²。根据草地生态适宜性评价结果,草地面积不应该超过现有草地面积与宜草性为高度、中度和临界适宜的未利用地之和(59648 km²)。

(5) 建设用地(x_5)约束

① 内蒙古草原勘察设计院. 鄂尔多斯市草地资源调查数据. 2002

由于研究区人口密度相对较小,近期内人均建设用地保持 2008 年现状水平,2015 年建设用地面积需求为 1222.91 km²。《鄂尔多斯市城市总体规划(2008—2020)》^①中城镇规划总面积为 2234 km²。

(6) 未利用地(x_6)约束

风沙区、水土流失区和干旱硬梁区(总面积为 21044.28 km²)是生态建设的重点。近年来通过各种工程措施,未利用地将呈现减少的趋势。根据土地生态适宜性评价结果,在目前技术水平下,不适宜耕地、林地和草地的未利用地(11391.73 km²)无法进行利用。

(7) 水资源约束

研究区年可以利用水资源量为 36.6 亿 m³。2008 年,农田灌溉用水量 12.0086 亿 m³,林果灌溉用水量为 0.2225 亿 m³,牲畜用水量为 0.9459 亿 m³,工业用水、城镇公共用水、居民生活用水和生态环境用水总量为 3.7534 亿 m³^②,进一步可计算出不同土地利用类型的单位面积用水量,水资源约束可用不等式表示为:

$$423978.59x_1 + 5722.53x_2 + 1667.90x_3 + 338788.15x_5 \leq 3660000000 \quad (7)$$

(8) 土壤侵蚀约束

土壤侵蚀降低到可接受水平是保障流域生态安全和建立土地利用生态安全格局的首要任务。各种土地利用类型的土壤侵蚀模数不同,根据周平等的研究成果^[34],参考水利部批准的土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007),将研究区平均土壤侵蚀等级控制在微度和轻度,即区域平均土壤侵蚀模数应小于 1500t/(km²·a)。因此,土壤侵蚀约束条件用不等式表示为:

$$1306.74x_1 + 2861.60x_2 + 1238.36x_3 + 832.31x_4 + 1059.79x_5 + 679.74x_6 \leq 1.3012 \times 10^8 \quad (8)$$

3.1.4 多目标优化模型求解

采用效用最优模型来寻求目标达到最大值时的可行解,可行解应满足下列目标:

$$\max(w_1 \sum_{i=1}^6 \alpha_i x_i + w_2 \sum_{i=1}^6 \beta_i x_i) \quad (9)$$

式中, w_1 、 w_2 分别表示经济安全目标和生态安全目标的权重; α_i 和 β_i 分别为标准化后各种用地类型的产值系数和生态安全系数。

具体求解过程:

(1) 采用专家咨询法确定与经济安全目标和生态安全目标相应的权重; $w_1=0.5$, $w_2=0.5$;

(2) 由于各目标量纲不同,采用极差标准化对各目标用地类型系数进行归一化处理,便于各目标的综合;

(3) 借助 MATLAB 优化工具箱(Optimization Toolbox)编写程序求解多目标优化模型,最终得到合适的非劣性解。

3.2 结果与分析

从图 2 可以看出,与 2008 年土地利用现状相比,2015 年耕地、林地、水域和建设用地呈现增加趋势,分别增加了 36.29%、105.83%、287.69% 和 101.64%。其中,水域面积增加较多,一方面可能是由于水域的生态安全值较高,另一方面是由于缺乏对水域面积的约束条件。草地面积基本保持不变。未利用地面积呈现大幅度下降趋势,减少了 45.87%,说明了未来土地利用格局的调整主要来自对未利用地的开发利用。优化后的土地利用数量结构在经济和生态方面均有明显改善。经济产值由 2008 年的 783 亿元上升到 1521 亿元,增长率为 94.18%。优化后,土地生态安全水平呈现增加趋势,平均生态安全指数由 2008 年的 64.39 提高到 64.64。水资源利用均有所增加,这与消耗水资源较多的耕地、林地和建设用地面积的增加有关。土壤侵蚀量较 2008 年也有所增加,这与土壤侵蚀模数较大的耕地和林地大面积增加有关。然而,水资源消耗量和土壤侵蚀总量满足约束条件,处于可接受水平之内。

① <http://www.ordosgh.gov.cn/>

② 鄂尔多斯市水利局. 2008 年度水资源公报, 2009

4 土地利用生态安全格局构建

“安全格局”概念是在土地利用优化研究的基础上,在全球环境变化、资源枯竭和生物多样性丧失的大背景下提出的^[35]。本研究以多目标优化、土地生态适宜性评价、区域土地生态安全评价^[32]和城市与矿产资源总体规划为依据,在生态安全和经济安全两种情景下,遵循建立的土地利用类型调整原则,借助 Arc GIS 空间分析技术,构建土地利用生态安全格局。

4.1 调整原则

4.1.1 生态安全情景下土地利用格局调整原则

(1) 耕地调整原则

基于土地生态适宜性评价结果,现状为耕地、适宜性为高度或中度的图斑保持耕地属性不变。现状为耕地、宜耕性为临界适宜或不适宜的图斑调整为生态用地,当该图斑宜林性为高度或中度适宜时,则退耕还林;当该图斑宜林性为临界适宜或不适宜时,则退耕还草。现状为未利用地,宜耕性为高度适宜时则调整为耕地。上述调整后,如耕地面积仍然小于优化面积,则将现状为未利用地且宜耕性为中度适宜的图斑调整为耕地。

(2) 林地调整原则

现状为林地的图斑保持属性不变。现状为耕地、宜耕性为临界适宜和不适宜的图斑,宜林性为中度或高度适宜,则转化为林地。现状为未利用地、宜耕性为临界适宜或不适宜,宜林性为高度适宜的图斑调整为林地。现状为未利用地、宜耕性为临界适宜或不适宜、宜林性为中度适宜、宜草性为中度、临界适宜或不适宜的图斑,转化为林地。现状为未利用地、宜耕性为中度适宜、宜林性为高度适宜的图斑,如果耕地调整后的面积已大于优化面积,则转化为林地。现状为未利用地、宜耕性为中度适宜、宜林性为高度适宜、宜草性为中度、临界适宜或不适宜的图斑,如果耕地调整后的面积已大于优化面积,则转化为林地。

(3) 草地调整原则

基于生态用地保持不变的原则,对于现状为草地的图斑,保持其属性不变。现状为耕地、宜耕性为临界适宜或不适宜、宜林性为临界适宜或不适宜的图斑,则退耕还草。现状为未利用地、宜耕性为临界适宜或不适宜、宜林性为临界或不适宜、适宜草地的图斑,将其调整为草地。现状为未利用地、宜耕性为临界适宜或不适宜、宜林性为中度适宜、适宜草地的图斑,如果林地面积满足优化面积,则将其调整为草地。现状为未利用地,宜耕性为中度,宜林性为中度、宜草性为高度的图斑,当耕地满足优化面积时,则调整为草地。现状为未利用地、宜耕性为中度适宜、宜林性为中度适宜、宜草性为中度适宜,如果耕地和林地已经满足优化面积,则调整为草地。

4.1.2 经济安全情景下土地利用格局调整原则

土地经济安全是落实地区中长期经济社会发展战略的根本保证^[36]。按照供给制约需求和节约集约原则,在保障重大基础设施建设的前提下,对非农用地增长速度与规模加以控制。

(1) 城镇建设用地调整原则

依据《鄂尔多斯市城市总体规划(2008—2020)》中确定的“一主两副十五镇,四条优化发展走廊”的城镇体系结构,根据各城镇规模,对各城镇中心作不同距离(10 km、15 km、20 km)的缓冲区,对缓冲区内的土地利用类型按照如下原则进行调整:现状为建设用地,保持土地利用图斑属性不变;现状为未利用地、宜耕性为临界或不适宜、宜林性为临界或不适宜、宜草性为临界或不适宜的图斑,如果生态安全水平为临界安全或安全,则调整为建设用地;现状为未利用地、宜耕性为临界或不适宜、宜林性为临界或不适宜、宜草性为中度适宜的图斑,如果建设用地面积未满足优化面积且图斑为安全或临界安全水平,则调整为建设用地;现状为草地、宜草性为不适宜的图斑,如果建设用地未满足优化面积且图斑为临界安全或安全水平,则调整为建设用地;现状

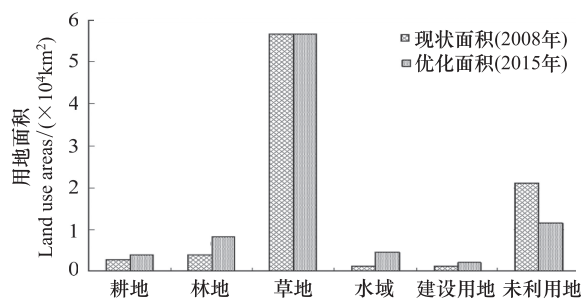


图2 鄂尔多斯市2015年土地利用优化面积和2008年土地利用现状面积比较

Fig.2 Current land use(2008) and optimal land use areas in Ordos

为草地、宜草性为临界适宜的图斑,如果建设用地未满足优化面积且图斑为临界安全或安全水平,则调整为建设用地,直到满足优化面积为止(图3)。

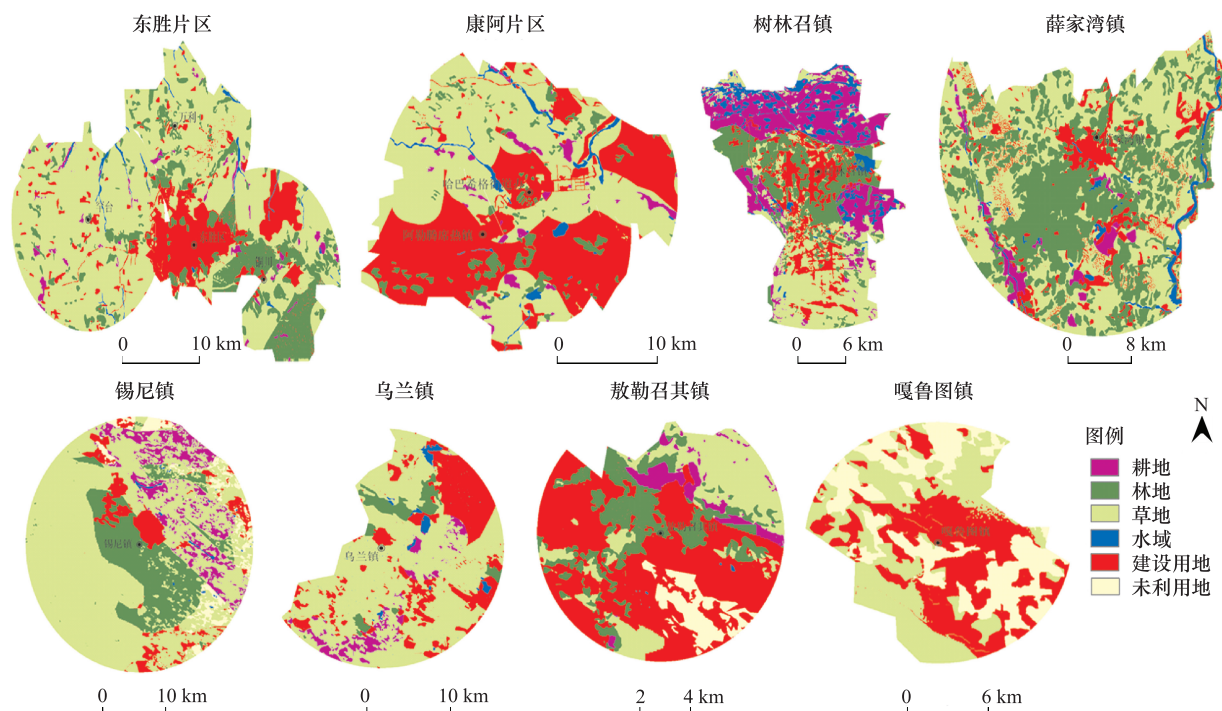


图3 经济安全情景下重点城镇土地利用格局

Fig. 3 Land-use pattern of key cities and townships under the scenario of economic security

(2) 工矿用地调整原则

依据《鄂尔多斯市矿产资源总体规划(2008—2020)》^①,针对大面积的煤炭和天然气开采和规划区,根据矿产资源特征、开发利用现状等,将开采规划区分为重点开采区、鼓励开采区、限制开采区、禁止开采区及矿产资源储备区五种类型。对资源禀赋高且开采条件好,区内基础设施完善,与其他产业相配套并采取了一定生态环境保护措施的地区,应当作为重点开发区或鼓励开发区;对于生态环境、历史文物、名胜古迹等保护区,重要城镇及基础设施等,应当设立为禁止开采区。

4.2 构建步骤

(1)将2008年土地利用现状图分别与耕地、林地和草地适宜性评价图层叠加,识别出不同土地利用图斑现状和对3种土地利用类型的适宜性特征。将叠加后的3个图层进行进一步叠加,新图层的图斑具有土地利用现状属性、耕地适宜性、林地适宜性和草地适宜性的属性信息,按照先前建立的耕地和生态用地调整原则,借助Arc GIS对上述图斑属性进行重分类即得到生态安全情景下的土地利用格局(图4)。

(2)对重点规划城镇作10、15 km和20 km不等距离的缓冲区,然后用各个乡镇的缓冲区对生态安全情景下的土地利用格局和2008年鄂尔多斯市土地生态安全图层^[32]进行掩膜裁切,将裁切的各城镇两个图层进行叠加。叠加后新图层的图斑具有现状地类、耕地、林地和草地适宜性特征和生态安全水平属性信息。按照先前建立的建设用地调整原则,借助Arc GIS对图斑进行重分类得到相关城镇土地利用格局。采矿区主要通过鄂尔多斯市矿产资源分布图、开发利用现状图进行数字化得到,并将其转化为栅格图层便于进行叠加分析。

(3)将经济安全情景下各重点规划城镇土地利用格局和主要开采区镶嵌到生态安全情景下的土地利用格局中,得到鄂尔多斯市土地利用生态安全格局(图5)。

① 由鄂尔多斯市国土资源局提供

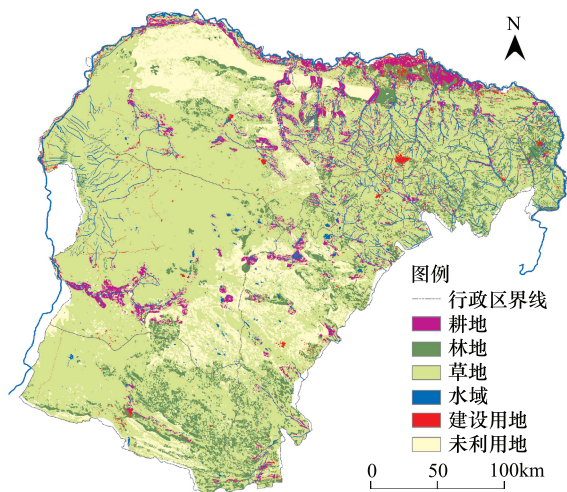


图 4 生态安全情景下鄂尔多斯市土地利用格局

Fig.4 Land-use pattern of Ordos under the scenario of ecological security

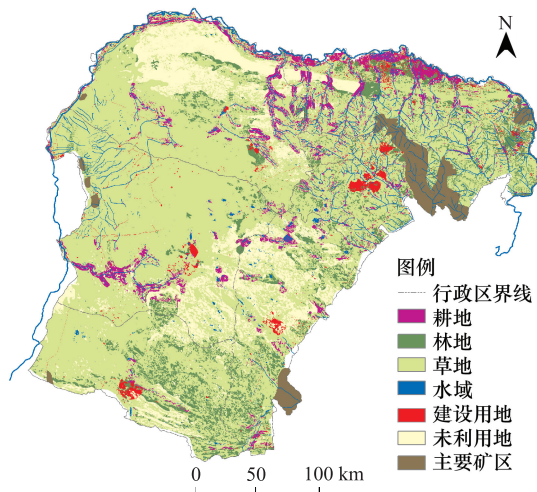


图 5 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局图

Fig.5 The map of land use ecological security pattern in Ordos

4.3 结果与分析

不同情景下鄂尔多斯市土地利用数量结构如表 2。其中,最终空间优化面积是在生态安全情景基础上,对建设用地和主要采矿区进行综合布局调整的结果。

表 2 不同情景下鄂尔多斯市土地利用数量结构/km²

Table 2 The quantitative structure of land use types in Ordos under different scenarios

土地利用类型 Land use pattern	2008 年面积 Area in 2008	多目标优化面积 Area of multi-objective optimization	生态安全情景 Scenario of ecological security		最终空间优化面积 Area of final spacial optimization
			优化面积 Optimized area	变化率 Change rate/%	
耕地 Cultivated land	2832.74	3860.78	4468.81	57.76	4397.21
林地 Woodland	3888.82	8004.50	8272.49	112.72	7811.13
草地 Grassland	56670.75	56610.73	58972.55	4.06	56371.25
水域 Water body	1199.49	4650.27	1199.49	0.00	1199.49
建设用地 Construction land	1107.93	2234.00	1107.93	0.00	建设用地 1646.93
未利用地 unused land	21045.27	11391.73	11392.17	-45.87	主要采矿区 2882.74 11352.78

(1)生态安全情景下土地利用格局

从表 2 和图 4 可以看出,不同用地类型的数量变化程度与空间分布都存在差异。耕地面积呈现上升趋势,比 2008 年增长了 57.76%。耕地主要分布在北部的黄河沿岸平原地区,西部草原区都斯图河流域,北部的十大孔兑流域下游平原区,南部的无定河流域以及中部地区水库和淡水湖泊的周边地区。林地面积增长了 112.72%。林地主要分布在达拉特旗北部沿河地区,薛家湾镇西部地区,研究区东南部以及各城镇周围地区等。草地面积略有增加,约 4.06%。草地主要分布在杭锦旗南部、鄂托克旗和鄂托克前旗大部分以及研究区东北部水土流失严重的丘陵沟壑区。未利用地呈现减少趋势,减少幅度为 45.87%,主要分布在北部杭锦旗境内的库布齐沙漠、乌审旗北部和鄂托克旗东南部的毛乌素沙地。

(2)经济安全情景下土地利用格局

与生态安全情景下的土地利用格局相比,经济安全情景下土地利用格局调整最显著的特点在于重点规划城镇建设用地面积增加和重点、鼓励采矿区的增加(图 5)。建设用地的面积为 1646.93 km²,新增建设用地主

要分布在东胜片区、康阿片区、树林召镇、薛家湾镇、锡尼镇、乌兰镇、敖勒召其镇、嘎鲁图镇等重点规划和发展较快的乡镇。主要采矿区的面积为 2882.74 km², 主要分布在准格尔东部地区、东胜煤田万利矿区、东胜煤田弓家塔矿区小纳林沟—纳林陶亥一带、桌子山煤田、上海庙区、巴拉贡区、纳林河开采区等区域。由于建设用地和采矿区的占用, 耕地、林地、草地和未利用地的面积略微下降。

5 结论与讨论

5.1 结论

(1) 土地生态适宜性评价结果显示, 高度和中度适宜耕地占现状耕地面积的 56.13%, 反映出部分耕地利用不合理, 需要调整。高度和中度适宜的林地占现状林地面积的 77.91%, 表明林地利用相对比较合理, 有少量林地需要加强保护。草地面积占研究区土地总面积的 65.38%, 其中高度和中度适宜的草地占现状草地面积的 78.91%, 表明研究区气候、土壤、水文等自然条件适宜于草地。未利用地中适宜性土地占 45.48%, 表明研究区有较大面积可调整的后备土地资源。

(2) 基于研究区土地资源数量、土地资源需求、水资源供给、土壤侵蚀控制等约束条件, 以经济安全和生态安全为目标, 构建了多目标优化模型进行土地利用数量优化。与 2008 年土地利用现状相比, 耕地、林地、水域和建设用地呈现增加趋势, 草地面积基本保持不变, 未利用地面积呈现大幅度下降趋势。优化后的土地利用数量结构在经济和生态方面均有明显改善, 水资源利用和土壤侵蚀均控制在合理范围之内。

(3) 依据土地生态适宜性评价结果、土地生态安全评价结果、城市与矿产资源总体规划, 借助 Arc GIS 软件中空间分析技术对耕地、林地、草地、城镇建设用地和未利用地进行调整, 建立了土地利用生态安全格局。结果表明: 耕地呈现增加趋势, 主要分布在黄河沿岸冲积平原区, 水资源充足的河流、淡水湖泊和水库周边地区以及城镇和乡村居民点周围; 林地大幅度增长, 主要分布在达拉特旗北部、准格尔旗东部以及乡镇居民点的周边地区; 草地略有增加, 广泛分布于库布齐沙漠和毛乌素沙地以外的其他地区; 未利用地大幅减少, 分布在北部杭锦旗境内的库布齐沙漠和乌审旗和鄂托克旗境内的毛乌素沙地; 建设用地增加主要用于重点规划城镇的扩展和矿产资源重点开采区。

5.2 问题与讨论

(1) 区域生态安全格局的生态安全标准量化问题仍是一项具有探索性的工作。如何通过目标函数或约束条件的设定体现生态安全的目标, 如何在深入理解景观格局、过程与功能相互关系的基础上, 确定生态过程的一系列阈值和安全层次, 是今后研究的一个重点。区域生态安全研究的对象具有特定性和针对性, 不同区域或者同一区域不同时期标准也有不同, 需要对区域生态安全现状进行综合定位, 有针对性地提出生态安全目标。

(2) 土地利用生态安全格局构建, 不仅要求土地利用数量结构的优化, 也需要对土地利用空间结构进行调整。同时, 土地利用生态安全格局涉及的因素多, 既有小尺度生态过程, 又有区域尺度的社会经济过程, 由于没有一种通用的模型方法, 因此根据实际问题进行多种模型的有机集成和灵活运用是构建土地利用生态安全格局的有效方法。

(3) 土地利用生态安全格局是使区域能够维持在生态安全水平上的土地利用格局, 可以为土地资源管理和生态系统管理提供指导, 但本身不具有城市或区域规划功能。

References:

- [1] Yu F, Li X B, Wang H, Yu H J. Land use change and eco-security assessment of huangfuchuan watershed. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61 (6): 645-653.
- [2] Shi P J, Wang J A, Feng W L, Ye T, Ge Y, Chen J, Liu J. Response of eco-environmental security to land use/cover changes and adjustment of land use policy and pattern in China. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 111-119.
- [3] Liu Y, Meng J J, Zhu L K. Progress in the research on regional ecological security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [4] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner B L II, Mortimore M, Batterbury S P J, Downing T E, Dowlatabadi H, Fernández R J, Herrick J E, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre F T, Ayarza M, Walker B. Global desertification: building a science for dryland

- development. *Science*, 2007, 316(5826):847-851.
- [5] Han W Q, Chang Y, Hu Y M, Li X Z, Bu R C. Research advance in landscape pattern optimization. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12):1487-1492.
- [6] Reshmidevi T V, Eldho T I, Jana R. A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems*, 2009, 101(1/2):101-109.
- [7] Nidumolu U B, van Keulen H, Lubbers M, Mapfumo A. Combining interactive multiple goal linear programming with an inter-stakeholder communication matrix to generate land use options. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22(1):73-83.
- [8] Bolliger J, Lischke H, Green D G. Simulating the spatial and temporal dynamics of landscapes using generic and complex models. *Ecological Complexity*, 2005, 2(2):107-116.
- [9] Schröder B, Seppelt R. Analysis of pattern-process interactions based on landscape models-Overview, general concepts, and methodological issues. *Ecological Modelling*, 2006, 199(4):505-516.
- [10] Yue D P, Wang J P, Liu Y B, Li H L, Xie H C, Wang D M. Landscape pattern optimization based on RS and GIS in northwest of Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11):1123-1231.
- [11] Sarker R A, Quaddus M A. Modelling a nationwide crop planning problem using a multiple criteria decision making tool. *Computer and Industrial Engineering*, 2002, 42(2/4):541-553.
- [12] He C Y, Shi P J, Li J G, Pan Y Z, Chen J. Scenarios simulation land use change in the northern China by system dynamic model. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4):599-607.
- [13] Guo T Y, Xu Y, Ma G X, Wang Z Q. A review of the theories and methods for regional economic spatial structure. *Progress in Geography*, 2009, 28(1):111-118.
- [14] Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):8-15.
- [15] Yu K J, Li H L, Li D H, Qiao Q, Xi X S. National scale ecological security pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10):5163-5175.
- [16] Liu X P, Li X, Peng X J. Niche-based cellular automata for sustainable land use planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6):2391-2402.
- [17] Duan Z Q, Verburg P H, Zhang F R, Yu Z R. Construction of a land-use change simulation model and its application in Haidian district, Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6):1037-1047.
- [18] He C Y, Shi P J, Chen J, Pan Y Z, Li X B, Li J, Li Y C, Li J G. Land use scene model based on system dynamics model and CA model. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2005, 35(5):464-473.
- [19] Zhang Y, Zhang H Q, Ni D Y. Design and implementation of the agricultural land use optimal allocation system. *Resources Science*, 2009, 31(12):2055-2064.
- [20] Cheng X L, An S Q, Qin P, Liu S R. The heterogeneity in spatial distribution of the above-ground biomass in the degraded grasslands in Ordos. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8):1526-1532.
- [21] Jia B Q, Gao Z G, Zhang H Q, Ci L J. The quantitative analysis of effect factors on sandy desertification in Ordos plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(6):15-20.
- [22] Jiang L H, Wang J Z, Zheng Y R, Hu Y Q, Sun S F. Regeneration of the degenerated ecosystems and the regional social-economic development in the Ordos plateau. *Arid Zone Research*, 2004, 21(2):144-149.
- [23] Luo H J, Bai H L, Fang X Q, Wang W J, Li Z H, Shen W M, Xiong W C, Zhang F. Ecosystem change and assessment of ecotone between agriculture and animal husbandry regions in north China in the last fifteen years-A case study of Ordos prefecture, Inner Mongolia. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4):474-481.
- [24] Ma J H, Cai D H, Xiao T. Qualified evaluating on the remote sensing of desertification-A case study of the Erdos region. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2007, 43(4):1-6.
- [25] Shi P J. Theory and Practice of Research on the Evolution of Geographical Environment-Research on the Evolution of Geographical Environment in Ordos Since Late Quaternary. Beijing: Science Press, 1991.
- [26] Local Chronicles Compilation Committee of Ih Ju League. *Ih Ju League Chronicles*. Beijing: Modern Press, 1994.
- [27] Bureau of Soil General Survey of Ih Ju League. *Soil of Ih Ju League*. Hohhot: Inner Mongolia People's Press, 1989.
- [28] Meng J J. *Land Evaluation and Land Management*. Beijing: Science Press, 2011.
- [29] Shi T G, Zheng G Q, Wang Z Y, Wang L L. Progress in research on land suitability evaluation in China. *Progress in Geography*, 2007, 26(2):106-115.
- [30] He Y B, Chen Y Q, Yang P, Wu W B, Yao Y M, Li Z B. An overview and perspective of alien land suitability evaluation study based on GIS technology. *Progress in Geography*, 2009, 28(6):898-904.
- [31] Luo D, Xu Y Q, Shao X M, Wang J. Advances and prospects of spatial optimal allocation of land use. *Progress in Geography*, 2009, 28(5):791-797.
- [32] Meng J J, Zhao C H, Liu M D. Regional ecological security assessment based on land-use change-A case study in Ordos city. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(4):578-590.

- [33] Cai Y L, Fu Z Q, Dai E F. The minimum area per capita of cultivated land and its implication for the optimization of land resource allocation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57 (2):127-134.
- [34] Zhou P, Meng J J. The temporal and spatial variability relationship of soil water erosion and land use type in Ordos during the period of 1988—2000. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10):1706-1717.
- [35] Ma K M, Fu B B, Li X Y, Guan W B. The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (4):761-768.
- [36] Chen B M, Zhou X P, Hu Y C, Wang X F. *Land Resource Science*. Beijing: Beijing Normal University Press, 2008.

参考文献:

- [1] 喻锋, 李晓兵, 王宏, 余弘婧. 皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. *地理学报*, 2006, 61(6):645-653.
- [2] 史培军, 王静爱, 冯文利, 叶涛, 葛怡, 陈婧, 刘婧. 中国土地利用/覆盖变化的生态环境安全响应与调控. *地球科学进展*, 2006, 21(2):111-119.
- [3] 刘洋, 蒙古军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. *生态学报*, 2010, 30(24):6980-6989.
- [5] 韩文权, 常禹, 胡远满, 李秀珍, 布仁仓. 景观格局优化研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(12):1487-1492.
- [10] 岳德鹏, 王计平, 刘永兵, 李海龙, 谢怀慈, 王冬梅. GIS 与 RS 技术支持下的北京西北地区景观格局优化. *地理学报*, 2007, 62(11):1123-1231.
- [12] 何春阳, 史培军, 李景刚, 潘耀忠, 陈晋. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. *地理学报*, 2004, 59(4):599-607.
- [13] 郭腾云, 徐勇, 马国霞, 王志强. 区域经济空间结构理论与方法的回顾. *地理科学进展*, 2009, 28(1):111-118.
- [14] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. *生态学报*, 1999, 19(1):8-15.
- [15] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 乔青, 奚雪松. 国土尺度生态安全格局. *生态学报*, 2009, 29(10):5163-5175.
- [16] 刘小平, 黎夏, 彭晓鹏. “生态位”元胞自动机在土地可持续规划模型中的应用. *生态学报*, 2007, 27(6):2391-2402.
- [17] 段增强, Verburg P H, 张凤荣, 宇振荣. 土地利用动态模拟模型的构建及其应用——以北京市海淀区为例. *地理学报*, 2004, 59(6):1037-1047.
- [18] 何春阳, 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 李晓兵, 李京, 李月臣, 李景刚. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(5):464-473.
- [19] 张英, 张红旗, 倪东英. 农业土地利用优化配置系统的研建. *资源科学*, 2009, 31(12):2055-2064.
- [20] 程晓莉, 安树青, 钦佩, 刘世荣. 鄂尔多斯草地退化过程中植被地上生物量空间分布的异质性. *生态学报*, 2003, 23(8):1526-1532.
- [21] 贾宝全, 高志刚, 张红旗, 慈龙骏. 鄂尔多斯高原土地沙化过程中自然与人为因素的定量分析. *林业科学*, 2003, 39(6):15-20.
- [22] 姜联合, 王建中, 郑元润, 胡隐樵, 孙菽芬. 鄂尔多斯高原退化生态系统恢复与区域经济发展. *干旱区研究*, 2004, 21(2):144-149.
- [23] 罗海江, 白海玲, 方修琦, 王文杰, 李增慧, 申文明, 熊文成, 张峰. 农牧交错带近十五年生态环境变化评价——以鄂尔多斯地区为例. *干旱区地理*, 2007, 30(4):474-481.
- [24] 马金辉, 蔡迪花, 肖桐. 鄂尔多斯地区沙漠化遥感定量评价. *兰州大学学报:自然科学版*, 2007, 43(4):1-6.
- [25] 史培军. *地理环境演变研究的理论与实践——鄂尔多斯地区晚第四纪以来地理环境演变研究*. 北京:科学出版社, 1991.
- [26] 伊克昭盟地方志编纂委员会编. *伊克昭盟志*. 北京:现代出版社, 1994.
- [27] 伊克昭盟土壤普查办公室编著. *伊克昭盟土壤*. 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 1989.
- [28] 蒙古军. *土地评价与管理*. 北京:科学出版社, 2011.
- [29] 史同广, 郑国强, 王智勇, 王林林. 中国土地适宜性评价研究进展. *地理科学进展*, 2007, 26(2):106-115.
- [30] 何英彬, 陈佑启, 杨鹏, 吴文斌, 姚艳敏, 李志斌. 国外基于 GIS 土地适宜性评价研究进展及展望. *地理科学进展*, 2009, 28(6):898-904.
- [31] 罗鼎, 许月卿, 邵晓梅, 王静. 土地利用空间优化配置研究进展与展望. *地理科学进展*, 2009, 28(5):791-797.
- [32] 蒙古军, 赵春红, 刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价研究——以鄂尔多斯为例. *自然资源学报*, 2011, 26(4):578-590.
- [33] 蔡运龙, 傅泽强, 戴尔阜. 区域最小人均耕地面积与耕地资源调控. *地理学报*, 2002, 57(2):127-134.
- [34] 周平, 蒙古军. 鄂尔多斯市 1988—2000 年土壤水力侵蚀与土地利用时空变化关系. *自然资源学报*, 2009, 24(10):1706-1717.
- [35] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局:概念与理论基础. *生态学报*, 2004, 24(4):761-768.
- [36] 陈百明, 周小萍, 胡业翠, 王秀芬. *土地资源学*. 北京:北京师范大学出版社, 2008.

CONTENTS

Widespread of anaerobic ammonia oxidation bacteria in an eutrophic freshwater lake wetland and its impact on nitrogen cycle	WANG Shanyun, ZHU Guibing, QU Dongmei, et al (6591)
Responses of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent	XIA Mengjing, MIAO Ying, LU Zhaozhua, et al (6599)
Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream	ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al (6609)
An index of biological integrity: developing the methodology for assessing the health of the Baiyangdian wetland	CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al (6619)
MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake	LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al (6628)
The diversity of invasive plant <i>Spartina Alterniflora</i> rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary	ZHANG Zhengya, DING Chengli, XIAO Ming (6636)
Analyzing the azimuth distribution of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in subtropical regions of eastern China using the harmonic analysis	ZHAO Xingyun, LI Baohui, WANG Jian, et al (6647)
In the process of grassland degradation the spatial pattern and spatial association of dominant species	GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (6661)
Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan	TAN Bo, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (6670)
Simulating the effects of forestry classified management on forest biomass in Xiao Xing'an Mountains	DENG Huawei, BU Rencang, LIU Xiaomei, et al (6679)
The simulation of three-dimensional canopy net photosynthetic rate of apple tree	GAO Zhaoquan, ZHAO Chenxia, ZHANG Xianchuan, et al (6688)
The effect of <i>Phomopsis</i> B3 and organic fertilizer used together during continuous cropping of strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> Duch) ...	HAO Yumin, DAI Chuanchao, DAI Zhidong, et al (6695)
Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties	SU Dongxue, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (6705)
Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of <i>Eremosparton songoricum</i> populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China	ZHANG Yongkuan, TAO Ye, LIU Huiliang, et al (6715)
Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China	WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong (6726)
Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng	WU Zhongxin, ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, et al (6737)
Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009	YANG Qing, WANG Zhenliang, FAN Jingfeng, et al (6747)
Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China	MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qianet al (6755)
Additive partition of species diversity across multiple spatial scales in community culturally protected forests and non-culturally protected forests	GAO Hong, CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun (6767)
Environmental perception of farmers of different livelihood strategies: a case of Gannan Plateau	ZHAO Xueyan (6776)
Application and comparison of two prediction models for groundwater dynamics	ZHANG Xia, LI Zhanbin, ZHANG Zhenwen, et al (6788)
Pollination success of <i>Phaius delavayi</i> in Huanglong Valley, Sichuan	HUANG Baoqiang, KOU Yong, AN Dejun (6795)
Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil	YANG Yang, MENG Denglong, QIN Hongling, et al (6803)
Archaea diversity in water of two typical brackish lakes in Xinjiang	DENG Lijuan, LOU Kai, ZENG Jun, et al (6811)
Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors	ZHAO Yujuan, LI Fengchao, ZHANG Qiang, et al (6819)
Effects of bisphenol A on the toxicity and life history of the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LU Zhenghe, ZHAO Baokun, YANG Jiaxin (6828)
Effect of incubation temperature on behavior and metabolism in the Chinese cornsnake, <i>Elaphe bimaculata</i>	CAO Mengjie, ZHU Si, CAI Ruoru, et al (6836)
Functional and numerical responses of <i>Mallada besalis</i> feeding on <i>Coreyra cephalonica</i> eggs	LI Shuiquan, HUANG Shoushan, HAN Shichou, et al (6842)
Stability analysis of mutualistic-parasitic coupled system	GAO Lei, YANG Yan, HE Junzhou, et al (6848)
Effect of ultra-micro powder qiweibaishuan on the intestinal microbiota and enzyme activities in mice	TAN Zhoujin, WU Hai, LIU Fulin, et al (6856)
Review and Monograph	
The effects of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: a review	CHEN Hao, MO Jiangming, ZHANG Wei, et al (6864)
Effect of enhanced CO ₂ level on the physiology and ecology of phytoplankton	ZHAO Xuhui, KONG Fanxiang, XIE Weiwei, et al (6880)
Transboundary protected areas as a means to biodiversity conservation	SHI Longyu, LI Du, CHEN Lei, et al (6892)
Scientific Note	
The energy storage and its distribution in 11-year-old chinese fir plantations in Huitong and Zhuting	KANG Wenxing, XIONG Zhengxiang, HE Jienan, et al (6901)
Spatial pattern of sexual plants and vegetative plants of <i>Stipa krylovii</i> population in alpine degraded grassland	REN Heng, ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, et al (6909)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 21 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 21 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元