

DOI: 10.5846/stxb201803240584

曹飞飞, 付晓, 李嘉珣, 汪铭一, 吴钢. 基于灰色拓扑理论的草地生态系统损害基线动态预测. 生态学报, 2020, 40(2): 540-548.

Cao F F, Fu X, Li J X, Wang M Y, Wu G. The damage baseline of the grassland ecosystem based on grey topology theory: A dynamic prediction study. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 540-548.

基于灰色拓扑理论的草地生态系统损害基线动态预测

曹飞飞^{1,2}, 付 晓¹, 李嘉珣^{1,2}, 汪铭一^{1,2}, 吴 钢^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:生态环境损害鉴定评估是生态环境损害赔偿制度有效执行的关键。生态环境损害基线贯穿生态环境损害鉴定评估的整个过程, 是生态环境损害确认与损害修复的重要依据与标准。历史数据法是损害基线确认的优先采用方法, 以损害发生前 3 年平均值作为静态基线值, 难以体现基线的动态性与不确定性, 因此生态环境损害基线的动态研究尤为重要。选取净初级生产力 (NPP) 作为草地生态系统损害表征指标, 以锡林浩特市巴彦宝力格矿区未开发建设前 2000—2008 年 NPP 历史数据为基础, 运用灰色拓扑模型对矿区 2009—2011 年年均 NPP 基线值进行动态预测, 并将其与静态基线值进行比较, 探讨该方法的可行性。结果表明: 灰色拓扑模型建模精度高, 相对误差小, 该模型预测平均相对误差为 2.88%, 且 2009—2011 年的拟合曲线与实际变化曲线相一致, 将该模型预测结果作为动态基线值比静态基线值更能反映现实情况。构建的植被 NPP 基线动态预测方法为基线的确定提供一种解决思路, 具有一定的应用价值与科学合理性。

关键词: 矿区; 生态环境损害; 基线; NPP; 灰色拓扑预测

The damage baseline of the grassland ecosystem based on grey topology theory: A dynamic prediction study

CAO Feifei^{1,2}, FU Xiao¹, LI Jiaxun^{1,2}, WANG Mingyi^{1,2}, WU Gang^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Evaluation of the ecological/environmental damage is critical for the effective implementation of the ecological/environmental damage compensation system. The baseline is a critical gauge and standard for damage validation and successful restoration, which runs through the entire process of the ecological/environmental damage assessment. The method of historical data, which uses the average value of 3 years before the damage occurred, is preferentially used to ascertain the static baseline. However, reflecting the dynamics and uncertainty of the baseline is challenging. Thus, it is imperative to explore the dynamic baseline of the ecological/environmental damage. In this study, we selected the net primary productivity (NPP) as an indicator of the grassland ecosystem damage. Based on the historical data of NPP (2000—2008) before the development in the Bayanbaolige mining area, we estimated the dynamic baselines of NPP between 2009 and 2011 using the grey topological model and assessed the availability of the method by comparing with the static baseline values. The grey topological prediction model exhibited high modeling accuracy and small relative error. Compared with the actual values from 2000 to 2008, the average relative error was 2.88%. Meanwhile, the fitting curve of 2009—2011 was consistent with the actual curve. The findings of the grey topological model as dynamic baselines were

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFC0503603)

收稿日期: 2018-03-24; 网络出版日期: 2019-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wug@cees.ac.cn

better than that of the static baseline in presenting the real situation. In conclusion, the prediction method of the grey topological model offers a possible solution to the baseline determination, which has application value and scientific rationality.

Key Words: mining area; ecological/environmental damage; baseline; NPP; grey topological prediction

近些年来,我国一直处于工业化与城镇化的快速发展期,经济的高速发展,使得生态环境问题集中体现,生态环境污染与破坏事件进入高发期,环境保护相关诉讼案件急剧增加。据国家统计局数据显示,近 10 年人民法院审理的环保一审案件收案数居高不下,年均 1692 件,环境损害赔偿案件近年来以年均 25% 的速度递增^[1-2]。频发的生态环境损害问题,导致不同生态系统在结构和功能上呈现不同程度的退化,严重威胁到了区域的可持续发展与居民的健康福祉^[3-4]。面对日益频发的生态环境损害问题,2015 年 12 月国家出台了《生态环境损害赔偿制度改革试点方案》,2018 年由部分省份开展改革试点到全国试行,我国正在逐步地探索和建立生态环境损害赔偿制度。生态环境损害鉴定评估是指鉴定评估机构对生态环境损害事件进行科学化、规范化的鉴定评估,是生态环境损害公益诉讼,追究生态环境损害责任的必要步骤和有效措施,其主要流程包括明确损害行为是否发生及损害的类型,分析生态环境损害行为与生态环境损害结果的因果关系,评估生态环境损害行为所导致的损害的范围和程度,量化生态环境损害的经济价值,最终筛选和优化生态环境恢复至基线的修复方案并最终执行修复及评价修复效果^[5]。生态环境损害鉴定评估各项流程的科学化、技术化、规范化成为国内外研究的热点,并且国外已经形成一些较为成熟的技术方法、管理制度与法律法规^[6-10]。

生态环境损害基线是指污染环境、破坏生态行为发生前,评估区域内生态环境、生物要素及其所构成的生态系统服务的本初状态^[11]。生态环境损害基线是判断生态环境损害发生的依据,也是确认生态环境损害时空尺度、损害程度、确认生态环境损害修复的重要标准,在生态环境损害鉴定评估工作中发挥着极其关键的作用,在开展生态环境损害鉴定评估与生态修复时,必须选择与确定一个合理的基线^[12-13]。《生态环境损害鉴定评估技术总纲》中对历史数据法界定的基线值为损害行为发生前,过去 3 年的平均值作为静态基线值。但是,自然资源与生态系统的状态时刻处于变化中,损害事件发生前已存在的人类活动加上生态系统自身演化的动态性与不确定性,导致基线的动态性。损害基线实质是损害未发生前,生态系统的理论演化状态,静态的历史数据难以用于确定损害区域的基线^[14-16]。因此生态环境损害鉴定评估中,不能将损害行为的影响直接叠加在静态基线年上,而应将基线值作为一个动态的数值,采用一定的方法预测损害行为发生后一段时间的基线值,以此基线为标准评价损害行为对生态环境的影响。

损害表征指标的筛选是损害基线判定的基础。不同的损害行为,所作用的损害受体不同,损害的表征亦不同。生态系统损害基线包含了反映评估区域生态系统结构和功能状态的综合性指标集。针对草地生态系统,该指标主要包括环境要素指标(水体、大气、土壤理化指标),生物要素指标(植被的高度、盖度、多度、频度、牧草产量)及固碳释氧、防风固沙、保育土壤、生物多样性等生态系统功能表征指标^[17]。但是,由于目前大部分地区没有实现长期的生态环境定位监测,表征损害前生态系统结构、功能状态的历史数据难以获得。净初级生产力(NPP)是指单位时间与单位面积上,绿色植被通过光合作用扣除自养呼吸消耗后所累积的有机物数量^[18]。NPP 是生态系统中物质与能量运转的基础,直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力,是表征植被动态和固碳能力的基础和关键指标^[19]。生态系统中其他要素的不利变化,最终均可在植被净初级生产力上得以体现,其受损程度能在一定程度上反映生态系统破坏的程度^[20-21],且 NPP 易于通过遥感数据获得,从而实现时间上的连续性和空间上的全覆盖^[22]。本文以 NPP 作为草地生态系统损害的重要表征指标,以锡林浩特市巴彦宝力格矿区为例,将损害基线看作是一个动态的变量,运用未开发建设前(2000—2008 年)的 NPP 的历史数据所体现出来的特征和变化规律,通过灰色拓扑模型动态预测该矿区开发后 2009—2011 年 NPP 的数值,并将预测值作为动态基线值。该基线值能体现损害未发生前,生态系统原有的自

然和人类活动下的理论演化状态。通过该动态基线值和静态基线值与开发建设后的实际值进行比较,探讨两种方法在 NPP 基线确定中的可行性和选择性。

1 研究区概况

巴彦宝力格矿区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市巴彦宝力格苏木境内,南距锡林浩特市 38 km,地理坐标为 $115^{\circ}55'00''$ — $116^{\circ}35'00''$ E, $44^{\circ}20'00''$ — $44^{\circ}42'54''$ N,矿区东北—西南走向长 55.83 km,倾向宽 11.89 km,主要包括巴彦宝力格矿井、朝克乌拉矿井、大梁矿井,总面积为 650.03 km^2 ,具体位置如图 1。巴彦宝力格矿区属于中温带半干旱大陆性气候,草原夏季炎热,冬季寒冷,寒暑温差较大,昼夜温度变化显著。年平均气温约 8°C ,年平均降水量 294.10 mm,多集中在 6—8 月份,年平均蒸发量为 1788 mm,平均相对湿度 57.6%。评价区域地带性土壤为栗钙土,矿区所在地区的草原类型主要为低地草甸草原和典型草原。巴彦宝力格矿区是我国优质褐煤的主要分布区域,地处锡林郭勒盟的中部,是连接“京津唐”、河北北部缺煤地区以及东北经济区域的中心地区。根据《内蒙古锡林郭勒巴彦宝力格矿区总体规划》,该矿区为国家核准煤炭规划矿区,2009 年之前矿区内一直未进行过开采活动,也无小煤窑破坏,为整装矿区。巴彦宝力格矿井和朝克乌拉矿井计划 2009 年开工建设,建设期为 2.0 年,2011 年分别达到 8.00 Mt/a ,总规模达到 16.00 Mt/a 。

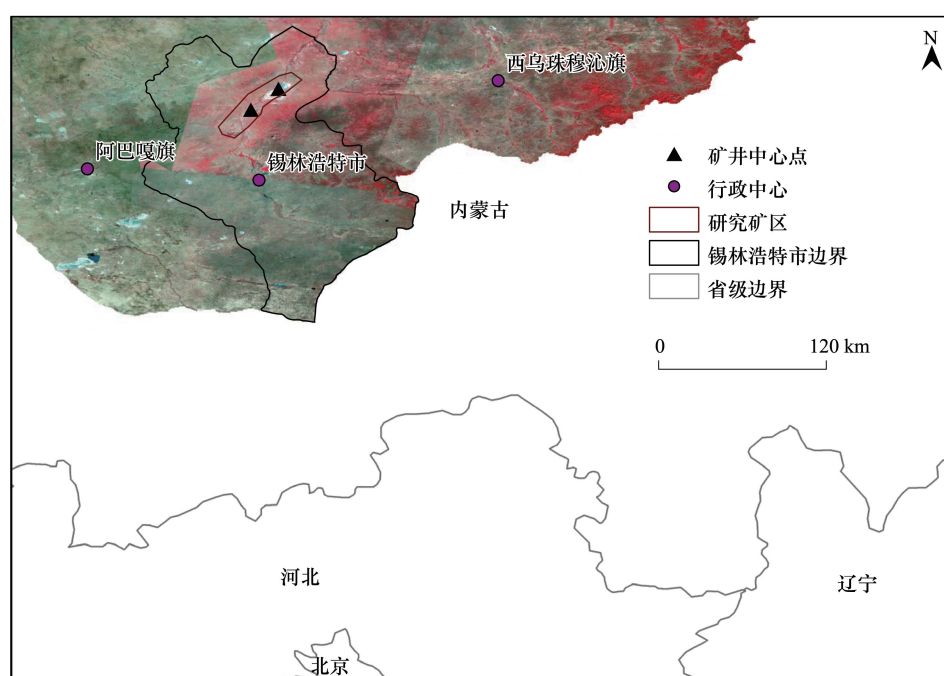


图 1 巴彦宝力格矿区位置图

Fig.1 Location of the Bayanbaolige mining area

2 数据与方法

2.1 数据来源及其预处理

本文所用的遥感数据为来自美国 NASA EOS/LPDAAC 的 2000—2011 年的 MOD17A3 数据 (https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool),空间分辨率为 1000 m。该数据参考 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型模拟得到陆地生态系统年均 NPP,已被广泛用于区域植物生长状况及生物量的监测^[23-24]。该数据采用 Sinusoidal 投影并已进行去云、辐射校正、大气校正等处理,利用 MODLAND 提供的 MRT (MODIS REPROJECTION TOOL) 投影转换工具,对数据进行拼接和投影转换,投影为 Albers 投影,坐标系为 WGS-

1984,并利用锡林浩特市巴彦宝力格矿区边界进行了研究范围的裁剪。

2.2 研究方法

1982年,我国学者邓聚龙提出的灰色系统理论,是一种研究少数据,贫信息不确定性问题的新方法。该理论自创立以来,尤其是灰色预测理论,在环境质量和生态安全领域得到广泛的应用^[25-26]。GM(1, 1)模型作为灰色预测理论的一种预测手段,是将随机的原始时间序列进行累积叠加,得到规律性较强的以指数形式为基础的新的时间序列,然后将新的时间序列转化为微分方程,建立发展变化模型并进行预测^[27]。GM(1, 1)模型要求原始时间序列光滑平稳,是一特定的指数曲线,该模型对波动幅度较大的时间序列的预测精度较低,不能反映不规则的波形^[28-29]。而净初级生产力(NPP)受诸多因素影响,数据波动性大,波动规律性又较差,采用基本的GM(1, 1)预测方法很难对其进行准确预测。灰色拓扑预测是对一段时间内系统行为特征数据波形的预测。它从给定的一系列阈值出发,一个模型对应一个阈值,建立多个GM(1, 1)群,利用多个GM(1, 1)模型对未来的时刻进行预测,从而得到未来发展的总体趋势预测图^[30-31]。灰色拓扑预测能弥补单一GM(1, 1)模型的不足,对摆动幅度较大且频繁的序列的预测有很大的优势。灰色拓扑预测模型群建立的步骤如下:

(1) 等高线的选取与等高时刻序列计算

对于原始序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, 设 $\max X$ 为序列的最大数据, $\min X$ 为序列的最小数据。对于 $\forall \xi \in [\min X, \max X]$, 称 $X = \xi$ 为 ξ -等高线。称方程组:

$$\begin{cases} X = x(k) + (t - k)(x(k+1) - x(k)) & | k = 1, 2, \dots, n-1 \\ X = \xi \end{cases} \quad (1)$$

的解为 ξ -等高线。设 $(p_1, p_2, \dots, p_m)$ 为 ξ -等高点序列, 其中 p_i 位于 t_i 段折线上, 令 $q(i) = t_i + \frac{\xi - x(t_i)}{x(t_i+1) - x(t_i)}$, $i = 1, 2, \dots, m$, 则称 $Q^{(0)} = (q(1), q(2), \dots, q(m))$ 为 ξ 等高时刻序列, 并对等高时刻序列中的元素按时间先后顺序重新排序。阈值 ξ 选取既要符合原始数列的特征, 也要防止阈值间隔选取的过密而造成失效点的产生^[32]。

(2) 对等高时刻序列 $Q^{(0)}$ 建立 GM(1, 1) 模型

对不同的等高点 ξ_j 的等高时刻序列, 建立一系列的 GM(1, 1) 模型分别进行预测。灰色系统 GM(1, 1) 预测是对随机的原始时间序列以一次累加转化为具有指数变化规律的新的时间序列来确定积分常数, 将时间序列转化为微分方程, 其数学表达式为^[33]:

$$\hat{Q}^{(1)}(k+1) = (Q^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (2)$$

式中, $\hat{Q}^{(1)}(k+1)$ 为 $\hat{Q}^{(0)}(k+1)$ 的一次累加值, 且 $\hat{Q}^{(0)}(k+1) = \hat{Q}^{(1)}(k+1) - \hat{Q}^{(1)}(k)$, k 为时间序列, a 为发展系数, u 为灰色作用量。

(3) 对模型群进行精度检验, 判别模型等级

预测模型精度检验合格之后才能用于预测, 模型精度的检验采用后验差比值及小概率检验。原始序列的方差为 $S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2$, 残差序列的方差为 $S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [e(k) - \bar{e}]^2$ 。后验差比值为 $C = \frac{S_2}{S_1}$, 小误差概率为 $p = P\{|e(k) - \bar{e}| < 0.6745S_1\}$, e 为残差。检验标准见表 1。

(4) 利用 GM(1, 1) 模型得到等高时刻序列 ξ_j 的预测值

对符合精度检验的 ξ_j 等高时刻序列进行 GM(1, 1) 预测, 将所有等高时刻序列中的元素从小到大重新排序。按照精度高的模型预测值作为预测结果的原则, 本文主要依据后验差比值 C 较小的模型预测值作为预测最终结果。模型的预测结果大多会存在矛盾点的问题, 即预测的时间点大多不是整点, 且每个整点附近可能存在多个非整点的时间预测值, 每一个非整点预测值又对应不同的阈值, 本文采用张琼楠等^[29]的优化处理

方法。最后将筛选确定后的预测时刻相应的阈值点绘在平面上并连结成曲线,即得目标拓扑预测曲线。

表 1 灰色预测精度检验等级参照表

Table 1 Accuracy test standard of grey prediction

精度等级 Accuracy grade	后验差比值 C Posterior error ratio C	小误差概率 P Micro error probability P
1	0.35	0.95
2	0.50	0.80
3	0.65	0.70
4	0.80	0.60

3 结果

3.1 NPP 年际时空变化

2000—2008 年巴彦宝力格矿区植被净初级生产力 (NPP) 年均统计值见图 2。2000—2008 年间,单位面积 NPP 年均值呈波动变化状态,总体呈上升趋势。变化范围为 $94.72\text{--}151.33\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,平均值为 $125.15\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。其中,年均最高值出现在 2008 年,年均值为 $151.33\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。另外,2003、2005 年的年均 NPP 较高,年均值均超过 $140\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。年最低值出现在 2000 年,年均值为 $94.72\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

2000—2008 年 NPP 年平均值空间分布见图 3,空间分布差异明显,变化范围为 $0\text{--}250.29\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。2000—2008 年巴彦宝力格矿区 NPP 年平均值为 $123.75\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,大部分区域 NPP 年均值范围为 $120\text{--}140\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,面积占比 57.28%,研究区中北部的巴彦宝力格矿井区域及水库周边区域 NPP 值较低,分布范围在 $0\text{--}100\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,东北顶部与西南底部 NPP 值较高,大于 $160\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

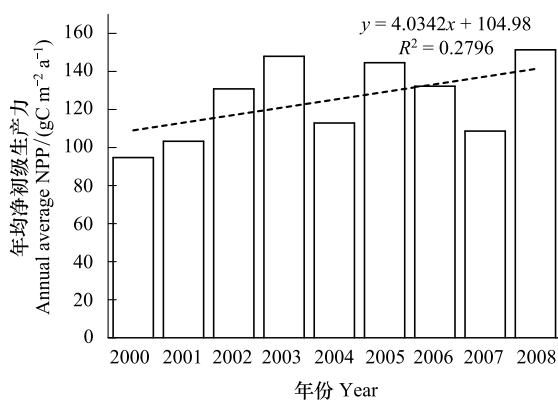


图 2 2000—2008 年巴彦宝力格矿区 NPP 年际变化

Fig. 2 Inter-annual variations of NPP in Bayanbaolige mining area from 2000 to 2008

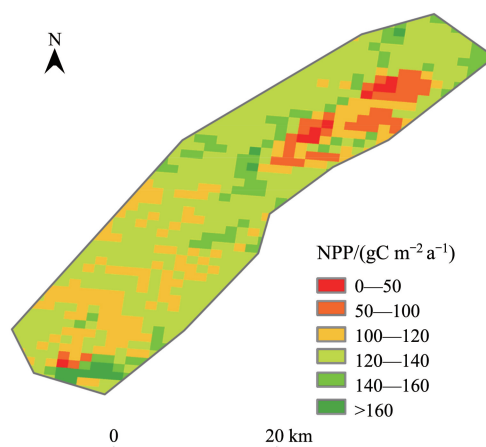


图 3 2000—2008 年巴彦宝力格矿区年均 NPP 空间分布

Fig. 3 Spatial pattern of mean annual NPP in Bayanbaolige mining area from 2000 to 2008

3.2 灰色拓扑模型预测结果

因为数据的有限性,结合 GM(1, 1) 模型有效预测的精度,时间越远的数据预测精度越低,预测偏差越大,因此本文以巴彦宝力格矿区未开发建设前 2000—2008 年的 NPP 历史数据,根据上述灰色拓扑预测理论,仅对 2009—2011 年的年均 NPP 进行预测,将预测值作为动态基线值。根据 2000—2008 年 NPP 数据,选取 7 条等间隔的等高线, ξ_j 为 (94.72, 104.15, 113.59, 123.03, 132.46, 141.90, 151.33), 按照时间先后顺序确定的 7 个等高线的等高时刻序列如下表示:

$$Q_1^{(0)} = (0.89, 1.00, 1.69, 4.43, 5.52, 7.67, 8.59)$$

$$Q_2^{(0)} = (1.44, 2.03, 2.10, 4.72, 5.25, 7.89, 8.19)$$

$$Q_3^{(0)} = (1.99, 2.37, 3.21, 4.98, 7.79, 8.12, 8.51)$$

$$Q_4^{(0)} = (2.55, 2.72, 4.31, 4.71, 5.32, 7.39, 7.75, 8.34)$$

$$Q_5^{(0)} = (3.06, 4.44, 5.42, 5.62, 6.98, 8.56)$$

$$Q_6^{(0)} = (3.40, 3.65, 4.17, 5.92, 6.22, 6.52, 8.78)$$

$$Q_7^{(0)} = (3.74, 3.90, 4.20, 5.45, 6.19, 7.62, 9.00)$$

以等高时刻序列为建模的原始数据,对等高时刻序列数目 ≥ 4 的 $Q_j^{(0)}$ 进行 GM(1, 1) 建模,并依据表 1 的精度等级划分标准,对各阈值模型进行后验差比值 C 及小概率 P 检验。表 2 列出了检验的结果, C 值均小于 0.35, 小误差概率均为 1, 建模精度在一等级。因此该拓扑预测模型群具有一定的可靠性,可以用于预测。

表 2 GM(1, 1) 预测模型及精度检验结果

Table 2 Results of GM (1, 1) model and accuracy test

等高线 Contour line	GM(1, 1) 模型 GM(1, 1) model	后验差比值 Posterior error ratio	小误差概率 Micro error probability	等级 Grade
94.72	$\hat{q}_1^{(1)}(k+1) = 5.6651e^{0.3137k} - 4.762$	0.25	1.00	1
104.15	$\hat{q}_2^{(1)}(k+1) = 7.8706e^{0.2662k} - 6.427$	0.26	1.00	1
113.59	$\hat{q}_3^{(1)}(k+1) = 13.4362e^{0.2167k} - 11.441$	0.32	1.00	1
123.02	$\hat{q}_4^{(1)}(k+1) = 20.2956e^{0.1574k} - 17.750$	0.23	1.00	1
132.46	$\hat{q}_5^{(1)}(k+1) = 24.5576e^{0.1628k} - 21.497$	0.23	1.00	1
141.90	$\hat{q}_6^{(1)}(k+1) = 21.4855e^{0.1616k} - 18.083$	0.23	1.00	1
151.33	$\hat{q}_7^{(1)}(k+1) = 19.3151e^{0.1759k} - 15.570$	0.07	1.00	1

对各阈值的矛盾点,首先采取离预测点最近且精度最高的模型对应的阈值,若精度相同,则采用线性插值作为该预测点的阈值。表 3 显示了巴彦宝力格矿区 2000—2008 年 NPP 的实际值、预测值、绝对误差、相对误差情况。模型的相对误差最大为 12.34%, 平均相对误差为 2.88%。

表 3 2000—2008 年灰色拓扑模型预测结果及误差

Table 3 Prediction results and errors based on grey topological model from 2000 to 2008

年度 Year	实际值 Actual value	预测值 Predictive value	绝对误差 Absolute error	相对误差/% Relative error
2000	94.72	94.72	0.0	0.00
2001	103.26	104.15	0.89	0.86
2002	130.81	132.46	1.65	1.26
2003	147.94	151.33	3.39	2.29
2004	112.88	113.59	0.71	0.63
2005	144.56	132.46	-12.10	8.37
2006	132.22	132.46	0.24	0.18
2007	108.65	122.05	13.40	12.34
2008	151.33	151.33	0.00	0.00

2000—2011 年 NPP 实际值,拓扑预测拟合值,及以 2006—2008 年实际 NPP 的 3 年均值作为静态基线值的比较见图 4。灰色拓扑拟合曲线与实际变化趋势相一致。用该模型进行巴彦宝力格矿区 2009—2011 年的年均动态 NPP 基线值预测,结果分别为 $123.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $151.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $130.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。以矿区开发建设前 3 年的年均值作为静态基线值,基线值为 $130.73 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

3.3 基线判定结果

运用灰色拓扑理论预测巴彦宝力格矿区 2009—2011 年的动态 NPP 年均基线值。以矿区开发建设前三年的年均值作为静态基线值,两者相比结果发现,2009—2011 年动态基线与实际 NPP 变化趋势保持一致,均是先增加再降低,能反映矿区植被 NPP 的动态变化(表 4)。2009—2011 年 NPP 实际值与动态基线相比,由于 2009、2010 年为巴彦宝力格矿区建设的基建期,导致 2009、2010 年 NPP 单位面积年均损失为 17.69 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、4.83 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,年损失总量为 11.49 Gg C、3.14 Gg C ($1\text{Gg C}=10^9\text{g C}$),2011 年 NPP 单位面积年均增加值为 5.20 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,年增加总量为 3.38 Gg C。与静态基线相比,由于巴彦宝力格矿区基建建设,导致 2009 年 NPP 单位面积年均损失为 25.39 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,年损失总量为 16.50 Gg C, 2010、2011 年单位面积年均增加分别为 15.77 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、4.49 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,年增加总量分别为 10.25 Gg C、2.92 Gg C。

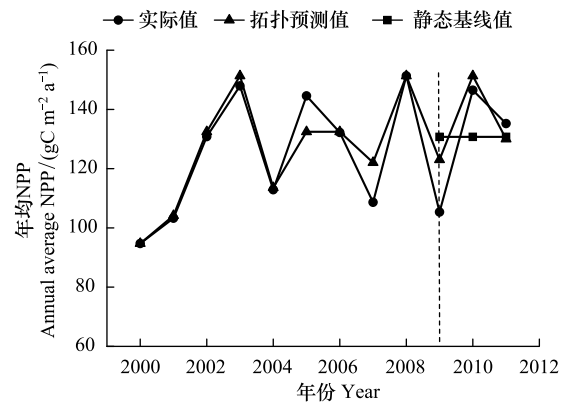


图 4 巴彦宝力格矿区年均 NPP 实际值、拓扑预测值和静态基线值

Fig.4 Actual values, topological predictions, and static baseline of annual average NPP in Bayanbaolige mining area

表 4 2009—2011 年巴彦宝力格矿区不同 NPP 基线值及与实际值比较结果

Table 4 Comparisons of different baseline values and actual values in Bayanbaolige mining area from 2009 to 2011

年份 Year	动态基线 Dynamic baseline	静态基线 Static baseline	差值 1 Difference 1	差值 2 Difference 2
2009	123.02	130.73	-17.69	-25.39
2010	151.33	130.73	-4.83	15.77
2011	130.02	130.73	5.20	4.49

差值 1: 实际值与动态基线值的差异; 差值 2: 实际值与静态基线值的差异

4 讨论

4.1 NPP 时空格局变化

气候变化与人类活动是引起 NPP 变化的主要因素。很多研究表明在干旱半干旱气候带降水因素是 NPP 变化的主要因素^[34-35]。在时间序列上,巴彦宝力格矿区 NPP 年均值波动较大,总体呈上升趋势。巴彦宝力格矿区位于锡林浩特市,根据锡林浩特气象局资料,锡林浩特市年总降水量也呈波动中上升趋势,图 5 所示。另一方面,2000 年后国家实施了京津风沙源治理、退耕还林还草、退牧还草、围封转移等一系列生态恢复工程,2000—2011 年整个锡林浩特的牲畜总量总体呈下降趋势,年均减少 28616 头(图 5)。2008 年锡林浩特降水量丰富,年均降水量高达 228.6 mm,并且放牧压力有所缓解,双重因素使得 2008 年 NPP 年均值较高。2000 年降水量为 191.92 mm,相对干旱,由于矿区统计数据相对缺乏,根据锡林郭勒盟统计年鉴,2000 年锡林浩特市 6 月末家畜量(大牲畜、羊、生猪)为 153.71 万头(只),气候干旱与持续过度放牧导致 2000 年 NPP 值较低。在

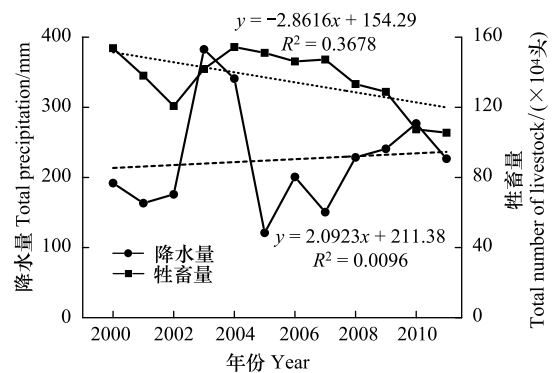


图 5 2000—2011 年锡林浩特市年降水、牲畜总量变化

Fig.5 Inter-annual variations of annual total precipitation and total livestock in Xilinhot from 2000 to 2011

空间分布上,2009 年之前矿区所在区域主要为天然草地,居民较少,无工业活动,矿区主要是典型草原,所以矿区大部分区域 NPP 值均高于 $120 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,仅仅在巴彦宝力格矿井及水库周边区域,由于靠近水库,放牧强度大,在巴彦宝力格矿井区域虽无开采,但一直在进行矿区开发的地质勘查与前期工作,人类活动比较密集,导致 NPP 值较低。

4.2 基线判定结果比较

损害行为发生前 3 年即 2006—2008 年的年均 NPP 平均值作为静态基线值,2009—2011 年的静态基线值为 $130.73 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。根据开发建设前 2000—2008 年的 NPP 变化趋势,利用灰色拓扑理论预测出的 2009—2011 年的动态基线值分别为 $123.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $151.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $130.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。2009—2011 年动态基线值均值为 $134.79 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,比静态基线均值高 $4.06 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,主要是因为 2009—2011 年相较于 2006—2008 年,摒除矿区开发建设因素,锡林浩特降水量持续增加,降水较为丰沛,而牲畜总量持续减少,放牧压力持续降低,使得 2009—2011 年 NPP 年均值要高于 2006—2008 年年均值。可见,动态基线能够反映矿区未开发建设前气候变化和人类活动导致的 NPP 的动态变化,且与 2009—2011 年 NPP 实际变化曲线相一致。与动态基线值相比,2009、2010、2011 年 NPP 变化量分别为 $-17.69 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $-4.83 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $5.20 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与动态基线相比较,2009、2010 年矿区 NPP 一直处于损失状态,且损失有减小趋势。由于 2009 年的基建建设,规划建设的煤矿工业场地、铁路专用线、运煤道路、灰场、矿区辅助附属企业等永久占地及施工过程中平整土地、开挖地表、材料堆放等临时占地,都需要占用大量的天然草地,导致 NPP 损失量较大,高达 $-17.69 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,随着工程的进行,生态修复开始实施,损失量就会相应减少,2010 年损失量减少至 $-4.83 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,且 2011 年后植被状态完全恢复,且 NPP 略有增长。可知,灰色拓扑模型预测动态基线不仅能反映损害前原有的人类活动和气候变化导致的 NPP 的变化趋势,而且比静态基线值更为可靠与反映现实情况。

5 结论

本文探讨了生态环境损害鉴定评估中动态基线的概念,动态基线即损害未发生前,原有的生产生活活动及生态系统自身演化所形成的理论演化状态。并探讨了动态基线的预测方法——灰色拓扑预测模型,以净初级生产力(NPP)为草地生态系统损害表征指标,对巴彦宝力格矿区进行 2009—2011 年 NPP 动态基线预测。结果表明:

从时间序列看,2000—2008 年巴彦宝力格矿区 NPP 年均值呈波动中缓慢增加趋势,变化范围为 $94.72—151.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,平均值为 $125.15 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。从空间分布看,矿区 NPP 空间分布差异明显,大部分区域 NPP 年均值范围为 $120—140 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,面积占比 57.28%,研究区中北部的巴彦宝力格矿井区域及水库周边区域 NPP 值较低。

灰色拓扑模型预测巴彦宝力格矿区 2009—2011 年的动态基线 NPP,分别为 $123.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $151.33 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $130.02 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。以损害行为发生前 3 年的年均值作为静态基线值,基线值 $130.73 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。灰色拓扑预测对于波动性大,规律性差的数据,预测误差范围小,预测精度高。该模型预测平均相对误差为 2.88%,且拟合曲线与实际变化曲线相一致,将灰色拓扑预测值作为动态基线值,比静态基线值更能反映现实情况。目前,草地生态系统损害基线的表征指标和判定方法仍处在探索阶段,本研究根据数据的可获取性和损害表征性选取 NPP 指标,对损害基线进行动态预测,是一个方法性的探索,NPP 指标对草地生态系统损害全面表征存在一定的局限性,未来的研究会探讨更为全面和有效的草地生态系统损害表征指标和判定方法。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [2] 於方, 张衍桑, 徐伟攀. 《生态环境损害鉴定评估技术指南 总纲》解读. 环境保护, 2016, 44(20): 9-11.
- [3] 刘国华, 傅伯杰, 陈利顶, 郭旭东. 中国生态退化的主要类型、特征及分布. 生态学报, 2000, 20(1): 13-19.
- [4] 吴钢, 李静, 赵景柱. 我国西北地区主要生态环境问题及其解决对策. 中国软科学, 2000, (10): 12-17.

- [5] 於方, 张衍桑, 齐霁, 赵丹, 徐伟攀. 环境损害鉴定评估关键技术问题探讨. 中国司法鉴定, 2016, (1): 18-25.
- [6] U.S. Department of the Interior. Natural Resource Damage Assessment Regulations. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, 1996.
- [7] European Commission (DG ENV). Study on the Implementation Effectiveness of the Environmental Liability Directive (ELD) and Related Financial Security Issues. Brussels: European Commission, 2009: 3-11.
- [8] Burger J. Environmental management: integrating ecological evaluation, remediation, restoration, natural resource damage assessment and long-term stewardship on contaminated lands. Science of the Total Environment, 2008, 400(1/3): 6-19.
- [9] Ofiara D D. Natural resource damage assessments in the United States: rules and procedures for compensation from spills of hazardous substances and oil in waterways under US jurisdiction. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(2): 96-110.
- [10] Dunford R W, Ginn T C, Desvousges W H. The use of habitat equivalency analysis in natural resource damage assessments. Ecological Economics, 2004, 48(1): 49-70.
- [11] 环境保护部环境规划院. 环境损害鉴定评估推荐方法(第 II 版). [2014-10-24]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201411/t20141105_291159.htm.
- [12] Burger J, Gochfeld M, Powers C W, Greenberg M. Defining an ecological baseline for restoration and natural resource damage assessment of contaminated sites: the case of the department of energy. Journal of Environmental Planning and Management, 2007, 50(4): 553-566.
- [13] 龚雪刚, 廖晓勇, 阎秀兰, 李尤, 杨坤, 赵丹. 环境损害鉴定评估的土壤基线确定方法. 地理研究, 2016, 35(11): 2025-2040.
- [14] Hobday A J. Sliding baselines and shuffling species: implications of climate change for marine conservation. Marine Ecology, 2011, 32(3): 392-403.
- [15] Kennedy C J, Cheong S M. Lost ecosystem services as a measure of oil spill damages: a conceptual analysis of the importance of baselines. Journal of Environmental Management, 2013, 128: 43-51.
- [16] 罗园. 基于生态系统的河流污染损害评估方法与应用[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [17] 万宏伟, 潘庆民, 白永飞. 中国草地生物多样性监测网络的指标体系及实施方案. 生物多样性, 2013, 21(6): 639-650.
- [18] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.
- [19] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [20] 周夏飞, 朱文泉, 马国霞, 张东海, 郑周涛. 稀土矿开采导致的植被净初级生产力损失遥感评估——以江西省赣州市为例. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 307-315.
- [21] 曹东, 於方, 朱文泉, 谢光轩, 宋存义. 遥感技术支持下的草地生态系统破坏经济损失评价. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1799-1807.
- [22] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S, Stisen S, Diouf A. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(3): 173-188.
- [23] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3/4): 282-292.
- [24] 王新闯, 王世东, 张合兵. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2797-2805.
- [25] 李改军. 1992—2001 年我国灰色系统理论应用研究进展. 系统工程, 2003, 21(5): 8-12.
- [26] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 267-272.
- [27] 杨华龙, 刘金霞, 郑斌. 灰色预测 GM(1,1)模型的改进及应用. 数学的实践与认识, 2011, 41(23): 39-46.
- [28] 李云贵, 李清富, 赵国藩. 灰色 GM(1,1)预测模型的改进. 系统工程, 1992, 10(6): 27-31.
- [29] 张琼楠, 陈元芳, 顾圣华, 刘敏, 康有. 优化的灰色拓扑模型在年径流预测中的应用. 水电能源科学, 2014, 32(4): 22-25.
- [30] 张举, 丁宏伟. 灰色拓扑预测方法在黑河出山径流量预报中的应用. 干旱区地理, 2005, 28(6): 751-755.
- [31] 车克钧, 贺红元. 祁连山森林生态环境与黑河流域径流量的灰色关联分析和拓扑预测. 生态学杂志, 1992, 11(5): 22-26, 39-39.
- [32] 陈彦晖, 甘爱平. 灰色波形预测模型的改进及应用. 统计与决策, 2016, (6): 75-78.
- [33] 周彬, 虞虎, 钟林生, 陈田. 普陀山岛旅游生态安全发展趋势预测. 生态学报, 2016, 36(23): 7792-7803.
- [34] Jobbágy E G, Sala O E, Paruelo J M. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. Ecology, 2002, 83(2): 307-319.
- [35] 刘海江, 尹思阳, 孙聪, 彭福利, 周澎. 2000—2010 年锡林郭勒草原 NPP 时空变化及其气候响应. 草业科学, 2015, 32(11): 1709-1720.