

近 35 年科尔沁沙地生态系统健康诊断研究 ——以巴林右旗为例

张 宁^{1,2}, 田美荣², 高吉喜², 钱金平¹

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 石家庄 050024; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘 要:干旱区沙地生态系统健康状况不仅决定其所提供生态服务大小,也决定着区域生态安全等级。因此,开展生态系统健康诊断,对摸清生态系统本底值,进而提高生态修复效率具有重要意义。以科尔沁沙地源头巴林右旗为研究对象,运用 PSR 模型构建生态系统健康诊断指标体系,将熵权法与综合评价法有机结合,确定了研究区生态系统健康指标权重和综合健康状况,并对研究区生态系统健康进行了分级诊断。结果显示:所选指标中围封草场面积的覆盖率熵权值 $W_j=0.0655$ 为最大值,表明围封草场面积是影响沙地生态系统健康的最主要指标。还发现近 35 a 中有 32 a 科尔沁沙地处于生态系统亚健康状态,1982 年、2009 年、2010 年处于不健康状态。这主要在于生态系统健康和状态指标呈正相关,人类活动可以辅助生态系统健康状态的恢复,同时,过度干扰生态系统的结构状态将影响生态系统的健康状况。

关键词:科尔沁沙地; 生态系统健康; 熵权法

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0206-06

Studies on Diagnosis of Ecosystem Health Nearly 35 Years in Horqin Sandy land —A Case Study in Balinyouqi

ZHANG Ning^{1,2}, TIAN Meirong², GAO Jixi², QIAN Jinping¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024,

China; 2. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: The health condition of arid sandy ecosystem determines not only the size of the ecological services they provide, but also the level of regional ecological security. Therefore, carrying out ecosystem health diagnosis is of great importance to the background value of ecosystem and to the increase of ecological restoration efficiency. We took Balinyouqi of Horqin Sandy Land as research site, used PSR model to construct the index system of ecosystem health diagnosis, and determine the ecosystem health index and overall health condition of the study area with the combination of entropy method and comprehensive evaluation method. And we also diagnosed the ecosystem health of the study area at different levels. The results show that the coverage rate of the enclosed grassland area in the selected index reaches to a maximum (0.065 5), indicating that the area of enclosed pasture is the main indicator influencing the health of sandy ecosystem. It also finds that in the recent 35 years, the ecological system of Horqin Sandy Land has been in the sub-healthy state for 32 years and was in unhealthy state in 1982, 2009 and 2010, which results from that the ecosystem health and state indexes are positively correlated. Human activities can assist the recovery of ecosystem health while excessive interference of ecosystem structure will affect the ecosystem health.

Keywords: Horqin Sandy Land; ecosystem health; entropy weight method

科尔沁沙地位于我国北方农牧交错带的中东部,是我国四大沙地中面积最大的沙地,其自然环境具有典型的过渡性和脆弱性特点^[1]。改革开放以来,长期

以垦殖和放牧为主的粗放式经营^[2],致使科尔沁沙地流动、半固定沙丘移动较快,沙地面积不断扩大,仅 1985—1992 年沙化草地面积就扩大了 41.4%^[3]。为

收稿日期:2015-06-23

修回日期:2015-07-23

资助项目:国家环境保护公益性行业科研专项项目“重要生态功能区退化生态系统生态修复模式研究与应用”(201409055);中央级公益性科研院所基本科研业务专项“基于生态保护红线的生态廊道构建技术研究”

第一作者:张宁(1989—),女,河北邢台人,硕士研究生,主要从事区域生态与恢复等方面的研究。E-mail:zhangning1989zhxy@126.com

通信作者:田美荣(1981—),女,内蒙古鄂尔多斯人,副研究员,博士,主要从事区域生态与恢复等方面的研究工作。E-mail:tianmeirong007@163.com

治理土地沙化,2000年以来我国在科尔沁沙地先后启动了“天然林保护工程”、“退耕还林还草工程”、“京津冀治沙防沙工程”,沙化面积虽有所减缓,但生态系统健康仍面临威胁。为了更好的保护科尔沁草原,有效治理科尔沁沙地,首先必须摸清其生态系统健康状况,才能“对症下药”对其进行生态修复。本文以科尔沁沙地的风源地巴林右旗为例,对沙地生态系统健康进行诊断,意义在于明确巴林右旗沙地系统生态健康状况,为提高生态修复效率提供数据支撑,为提升沙地生态系统监控和环境管理水平提供科学基础,使科尔沁沙地能为人类的生存和发展提供多种服务功能^[4-5]。

生态系统健康诊断评价主要有三种方法:指示物种法、指示区域法、指标体系法。指示物种法主要是通过检测生态系统中指示物种受到环境影响时的反映^[6],该方法在水生生态系统中应用较多。孔红梅等^[7]总结出了水生生态系统和森林生态系统的常用指示物种,如:浮游生物、低栖无脊椎动物等。指示区域法是采用一些关键的敏感区域作为生态系统健康的指示器,David Schindler 提出建议将湖泊作为评价生态系统健康的“警报器”^[8]。指标体系法主要是将所需的指标根据不同的分类标准分成不同的类别,典型的方法有 Costanza 提出的 VOR^[9]、联合国 OECD 和 UNEP 提出的 PSR(Pressure-State-Response)方法^[10],王雪^[11]等基于 PSR 模型以丰都县为例对其区域土地生态安全进行了评价,罗遵兰等^[12]运用该模型对松花江流域湿地生态系统健康进行了评价,胡秀芳^[13]等设计了草原生态安全评价的 PSR 的概念模型。

指标体系法中 PSR 模型具有较好的操作性,被学者广泛采用。主要因为 PSR 模型中压力、状态和响应指标之间没有明确的界线,模型框架逻辑性强,因果关系清晰,三个指标相互制约、相互影响、并强调结合具体的实际情况,应用起来较为灵活^[14]。因此,本文也采用 PSR 模型构建生态系统健康诊断指标体系。在模型诊断中,指标的权重系数确定非常重要,熵权法作为客观综合定权法,注重多项评价指标间的联系,通过度量指标所提供的有效信息量来确定其权重^[15-16],具有完备性、客观性和可操作性。本文为使指标权重更加客观合理,将熵权法与综合评价法有机结合,对研究区进行生态系统健康诊断,明确生态系统的健康状况与级别,为生态系统的保护与发展提供一定的依据。

1 研究区概况

巴林右旗位于内蒙古赤峰市北部,西拉沐沦河北岸,大兴安岭南段山地。地理坐标为东经 118°12′09″—

120°01′42″,北纬 43°12′55″—44°27′52″,总面积 10 256 km²。在其南部倾斜冲击平原区,广泛分布着流动、半流动和固定沙丘,构成沙丘与丘间地相间排列的地貌组合。其沙地面积占全旗面积的 34%,占到科尔沁沙地总面积的 6.5%,是科尔沁防风固沙功能区的重要组成部分^[17]。该旗属于温带半干旱大陆性季风气候,年日照时效为 3 000~3 200 h,平均气温为 4.9℃。年平均降水量为 358 mm 且相对变率高达 22%,年蒸发量为 2 103 mm,相当于降水量的 6 倍,湿润度多年平均值为 0.35。全年风沙日数达 70 d 左右,干旱,多风沙是该地的主要气候特点。

2 研究方法

2.1 PSR 模型

本文应用 PSR(Pressure-State-Response)模型作为科尔沁沙地典型区生态系统健康诊断指标体系的基本框架(图 1)。在 PSR 模型中,生态系统健康可由压力—状态—响应三个不同但相互联系的指标类型来表达:压力指标反映人类活动对生态系统造成的负荷;状态指标表征自然资源、生态系统的状况;响应指标表征人类面对生态系统健康问题作出的反映。沙地生态系统健康诊断的指标框架有非常清晰的因果关系,即人类活动对生态系统施加一定的压力,生态系统状态发生相应的变化,而人类针对生态系统发生的变化作出反映,以期维持生态系统健康的状态。

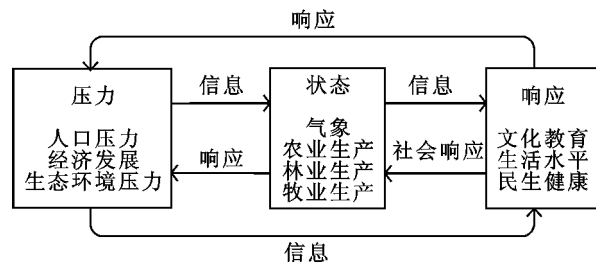


图1 沙地生态系统压力—状态—响应模型

2.2 评价指标体系的构建

根据以上表述和 PSR 模型的评价思路,构建了 4 个层次的指标体系,切实反映科尔沁沙地生态系统健康状况(图 2)。第 1 个层次是目标层:即科尔沁沙地典型区生态系统健康诊断;第 2 个层次是准则层:即压力、状态、响应 3 个准则层;第 3 个层次是要素层:即每个评价准则层具体由哪些要素来表征;第 4 个层次是指标层:整理所需的指标层数据来源于 1977—1996 年巴林右旗统计资料、1994—2013 年巴林右旗统计年鉴、巴林右旗辉煌的五十年、1989—2013 年内蒙古统计年鉴。

运用定量评价对沙地生态系统健康进行诊断,所选用的具体指标要能够表征生态系统的自然、社会和经济状况。其指标数据来源如下:

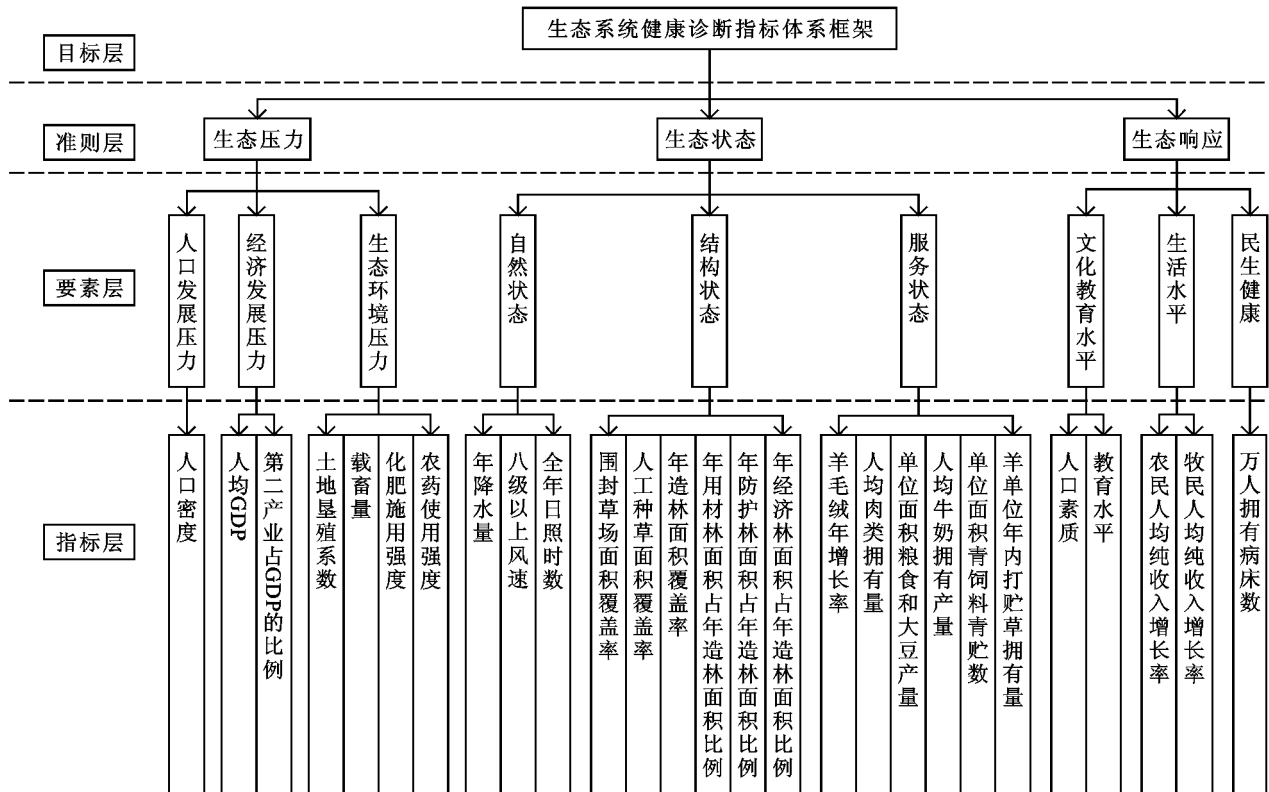


图 2 沙地生态系统诊断指标体系

(1) 压力指标。主要是指人类活动,经济发展给环境带来的压力和影响。与自然的沙地生态系统相比,巴林右旗位于科尔沁沙地的风沙源地,属于农牧交错带,生态环境脆弱,抗干扰能力差,区域内的人类活动往往对生态系统健康产生强烈而长期的影响。指标选择有人口密度表征人口增长的压力、人均GDP 表征经济发展的压力、第二产业占 GDP 的比例表征经济增长的质量、土地垦殖系数、载畜量、化肥施用强度等分别表征农业、牧业发展在发展过程中对生态系统造成的压力。从人口、经济、农业、牧业较为全面的来表征沙地生态系统所受到的压力。

(2) 状态指标。主要描述生态系统自然环境和系统内部结构的状态,体现环境要素的变化和采取环境政策的结果。指标选择生态系统的自然要素、结构状态及服务功能,其中自然要素包括年降水量、八级以上风速、全年日照时数;结构状态包括林业及牧业,用于表征其结构的实时和实际的状态,包括围封草场面积覆盖率、年造林面积覆盖率等;服务功能反映生态系统为人类生存和发展所提供的物质基础,包括羊毛绒年增长率、人均肉类拥有量、单位面积粮食和大豆产量、人均牛奶拥有产量等。其状态指标的实际意义在于,在自然要素的前提下,人为对生态系统的结构状态进行干扰,而相应的得到系统服务功能的回馈。

(3) 响应指标。主要反映了社会或个人受到生态系统服务功能影响,以及为了预防、减少、停止或恢复生态系统的不健康状态和不利于人类生存、发展的

环境状况所采取的措施。主要是从文化教育水平,体现人口素质对生态系统健康程度的影响;生活水平和民生健康,体现生态系统的服务功能对社会和个人发展的反馈。

2.3 综合健康指数法

为了能用定量的方法对沙地生态系统健康状态进行评价与诊断,需建立一个综合健康指数(Comprehensive Health Index, CHI)。其阈值范围为 0~1,0 值表征健康状态最差,1 值表征健康状态最好。为了更清晰的表述生态系统的健康状态,对综合健康指数值进行健康状态的分级^[18],可分为 5 级:很健康、健康、亚健康、不健康、病态。综合健康指数模型公式如下:

$$CHI = \sum_{i=1}^n w_i \times b_{ij} \tag{1}$$

式中: n 为评价指标的个数; w_i 为指标 i 的权重值; b_{ij} 为指标 i 的归一化值。

2.4 熵权法赋权指标权重法

由于指标体系中指标层的类型复杂,各指标系数间的量纲不统一,指标权重的确定尤为重要。熵权法为客观赋权法,反映信息无序化程度,可以度量信息量的大小,在沙地典型生态区健康评价和诊断中,某一指标反映的信息越多,表明该指标所在评价中起到的作用越大,得到的熵值越小,反之熵值亦大^[15],因此,运用熵权法对指标反映的信息进行度量,其各评价指标的权重值,最终由评价指标构成的判断矩阵来确定。熵权法赋权步骤如下:

(1) 构建评价指标的判断矩阵:
$$R=(r_{ij})_{m\times n} \tag{2}$$

式中: r_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的统计值; n 为评价指标; m 为评价对象,其中($i=1,2,3,\cdots,n;j=1,2,3,\cdots,m$)。

(2) 利用极差标准化方法对构成的判断矩阵进行归一化处理,其中评价指标中,有些指标与生态系统健康状态成正相关,即值越大越满意,如:围封草场面积覆盖率指标;有些指标与生态系统健康成负相关,即值越小越满意,如:土地垦殖系数。计算公式如下:

越大越满意的指标:
$$b_{ij}=\frac{r_{ij}-r_{\min}}{r_{\max}-r_{\min}} \tag{3}$$

越小越满意的指标:
$$b_{ij}=\frac{r_{\max}-r_{ij}}{r_{\max}-r_{\min}} \tag{4}$$

式中: r_{\max} 为同一指标不同评价对象中最满意者,则 r_{\min} 为最不满意者;式(4)中: r_{\max} 为同一指标不同评价对象中最不满意者,则 r_{\min} 为最满意者。

(3) 计算各评价指标的熵为:
$$H_j=-\left(\sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}\right) / \ln m$$

($i=1,2,3,\cdots,n;j=1,2,3,\cdots,m$) $\tag{5}$

式中: $f_{ij}=b_{ij} / \sum_{i=1}^n b_{ij}$ 当 $f_{ij}=0$ 时, $\ln f_{ij}$ 没有意义,因此对 f_{ij} 进行修正,修正式为:

$$f_{ij}=(1+b_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1+b_{ij}) \tag{6}$$

(4) 各评价指标的熵权为:
$$w_j=(1-H_j) / (n-\sum_{j=1}^n H_j) \tag{7}$$

当且仅当 $\sum_{j=1}^n W_j=1$

2.5 综合健康指数及分级

沙地 CHI 的值为 0~1,用连续的实数表示其等级标准,及值为 1 时为最好,值为 0 时为最差^[18]。(1) 0~0.2,表征 PSR 模型中压力过大,状态紊乱,响应过小,整个生态系统已失去其正常的功能;(2) 0.2~0.4,表征模型中压力较小,人类活动开始对生态系统的状态进行调节;(3) 0.4~0.6,表征生态系统仍承受一定的压力,但状态良好,响应及时;(4) 0.6~0.8,表征整个生态系统压力一状态一响应趋于合理,进入持续发展的阶段;(5) 0.8~1.0 表征生态系统极其稳固。

表 1 沙地生态系统健康指数分级标准

分级标准	很健康	健康	亚健康	不健康	病态
阈值	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
级别数	5	4	3	2	1

3 结果与分析

(1) 权重。利用极差方法对评价指标的原始判断

矩阵进行归一化处理,然后根据熵权法赋权计算得到熵值 H_j 。 H_j 是沙地生态系统中所选指标无序程度的一个度量值,其值越小,所提供的信息就越大,而其 W_j 权重值就越大。在压力指标中,如:人口密度的 H_j 值最小为 0.993 7,表示人口密度在沙地生态系统健康诊断中影响最大,人口密度越大, H_j 值越小, W_j 值越大,使得沙地生态系统趋向不健康状态。表 2 为结果显示:生态压力指标中,人口密度 W_j 值所占比重最大,为 0.050 6,其次为土地垦殖系数 0.043 0,载畜量 0.041 1,第二产业占 GDP 的比重 0.040 0,表明人口的发展以及对生态系统能源的消耗对生态系统健康造成的压力最大。状态指标中,围封草场面积覆盖率、人均牛奶拥有产量、人均肉类拥有量所占的比重较大,其 W_j 值依次为 0.065 5,0.059 8,0.051 3,反映人类生产活动对生态健康状况的影响起主要作用。尤其是围封草场面积的大小,围封草场面积越大越利于沙地生态系统趋向健康状态发展。响应指标中,人口素质 0.030 2,教育水平 0.050 0,所占比重较大,说明其对沙地生态系统健康的保护与恢复影响最大。人口素质和受教育水平直接影响着对沙地生态系统的保护意识程度。

H_j 值的大小代表该指标在该问题中,提供有效信息量的多寡程度。其 W_j 值则表征该指标对沙地生态系统健康的影响程度,值越大对生态系统健康的影响程度越大。对沙地生态系统健康影响较大的指标为围封草场面积、人均牛奶拥有量、人均肉类拥有量、单位面积青贮饲料青贮数、人口密度等指标,其在总指标体系中的 W_j 权重分别为 0.065 5,0.059 8,0.051 3,0.050 8 与 0.050 6,表明以上指标为影响巴林右旗 1977—2013 年沙地生态系统健康的主要指标。围封草场面积的增加,抑制土地沙化,减少沙化程度,促进沙地生态系统的健康恢复。人均牛奶拥有量、人均肉类拥有量等 W_j 值较大,表明对沙地生态系统的能量流、物质流索取较多,导致生态系统内部结构失衡,趋向不健康状态。

(2) 健康诊断。根据综合健康指数计算得出各准则层和目标层的综合得分情况,并依照生态系统健康指数分级标准进行分级,得出 1978—2013 年,改革开放以来近 35 a 中有 32 a 科尔沁沙地处于生态系统亚健康状态,1982 年、2009 年、2010 年处于不健康状态。1982 年沙地生态系统处于不健康状态。原因是 1982 年状态综合得分较低。对该年状态综合得分影响较大的指标为围封草场面积覆盖率、经济林面积占年造林面积比例。该年围封草场面积 87 356 hm^2 ,接近 35 a 来最低值,经济林面积较 1981 年增加了 619.9 hm^2 ,不仅未能抑制和减少沙化面积,并且经济林面积的扩大使得沙地生态系统的服务功能压力过大,致使 1982 年沙地生态系统处于不健康状态;2009 年出现不

健康状态主要因为 2009 年响应指标中的农民人均纯收入偏低,农民人均纯收入增长率仅 1.1%;未能为沙地生态系统的恢复提供一定的经济基础,降低了个人、家庭以及社会对沙地生态恢复的动力和积极性。

2010 年也出现不健康的状态,除受到 2009 年的影响外,2010 年的状态综合得分也较低,该年造林面积 5 694 hm²,仅用材林面积就占到 53.5%,致使沙地生态系统的结构功能状态严重失衡。

表 2 各指标权重值

准则层	要素层	指标层	w _i 熵值
生态系统 健康诊断 —压力	人口发展压力	人口密度(人/km ²)	0.0506
		人均 GDP(人/万元)	0.0266
	经济发展压力	第二产业占 GDP 的比例(%)	0.0400
		土地垦殖系数(%)	0.0430
	生态环境压力	载畜量(只)	0.0411
		化肥施用强度(kg/hm ²)	0.0379
		农药使用强度(kg/hm ²)	0.0288
生态系统 健康诊断 —状态	自然气象状态	年降水量(mm)	0.0315
		八级以上风速(d)	0.0381
		全年日照时数(h)	0.0192
		围封草场面积覆盖率(%)	0.0655
		人工种草面积覆盖率(%)	0.0340
	结构功能状态	年造林面积覆盖率(%)	0.0333
		年用材林面积占年造林面积比例(%)	0.0332
		年防护林面积占年造林面积比例(%)	0.0335
		年经济林面积占年造林面积比例(%)	0.0234
		羊毛绒年增长率(%)	0.0142
	服务功能状态	人均肉类拥有量(kg/人)	0.0513
		单位面积粮食和大豆产量(kg/hm ²)	0.0448
		人均牛奶拥有产量(kg/人)	0.0598
		单位面积青贮饲料青贮数(kg/hm ²)	0.0462
		羊单位年内打贮草拥有量(kg/只)	0.0508
生态系统 健康诊断 —响应	文化教育水平响应	人口素质(%)	0.0302
		教育水平(人/万人)	0.0500
	生活水平响应	农民人均纯收入增长率(%)	0.0210
		牧民人均纯收入增长率(%)	0.0188
	民生健康响应	万人拥有病床数(张/万人)	0.0330

依据沙地生态系统构建的指标体系,由图 3 可以直观、连续地反映 35 a 来其健康状况的发展趋势,由模型综合得分和 CHI 趋势线显示,有两个明显的波谷,即为沙地生态系统健康状况下滑,致使 1982 年、2009 年和 2010 年出现不健康的状态。而近几年呈现迅速上升趋势,其原因在于近几年巴林右旗进行防风固沙的治理,加大对流动、半流动沙丘的固化,使得生态系统健康状况显著好转。

压力、状态和响应的变化趋势并不是同步的,压力和响应的变化趋势具有一定的相似性,压力逐年呈现下降的趋势;响应总体趋势有所下降但变化相对平稳;状态则一直呈现上升趋势。随着经济社会的发展,人口发展压力与经济发展压力在不断增大,1978 年人口密度为 13.72 km²/人,至 2013 年增加到 19.01 km²/人;2013 年的 GDP 与 1978 年相比增加了 67.75 倍;

第二产业占 GDP 的比例由 1978 年的 9.3%到 2013 年上升至 56.6%,与此同时,2000 年以来巴林右旗实施了退耕还林、禁牧等措施。使得载畜量、化肥施用强度、农药使用强度逐年降低,促使生态环境压力相对减轻,因此至 2000 年以来,生态环境压力减轻量抵消了人口发展压力、经济发展压力的增加量,使得压力综合得分降低,整体压力相对减轻。

利用 SPSS 软件,对状态得分和模型综合得分进行散点图和相关关系分析,得出皮尔逊相关系数 0.741, sig 值为 0.000,回归系数为 1.107,表明状态得分与模型的综合得分呈正相关的关系,状态的变化对沙地生态系统的健康起主导作用。自然状态、结构状态以及服务状态是影响沙地生态系统健康的重要指标。良好的自然状态,相对合理的结构状态和平衡的服务状态才能使得沙地生态系统可持续健康的发展。

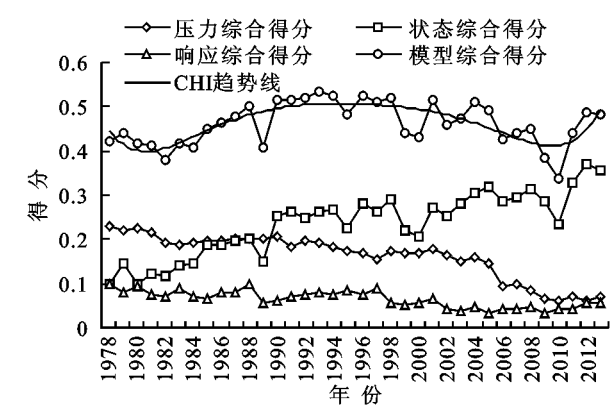


图 3 压力、状态、响应变化趋势及拟合曲线

4 结 论

(1) 沙地生态系统健康评价与诊断是沙地生态治理的前提,目前对沙地生态系统健康的诊断仍然较少。本文以生态系统健康的理论为基础,以 PSR 为评价思路,构建沙地生态系统健康与诊断评价体系模型,运用熵权法赋权进行定量分析。诊断结果显示研究区近 35 a 的健康状况虽有波动,但变化不大,其中 32 a 处在亚健康状态,1982 年、2009 年、2010 年处于不健康状态。如期望沙地生态系统逐渐朝向健康的趋势发展,必须要合理的处理好人类活动与生态系统的关系,调整好生态系统的结构状态和服务功能。否则恢复科尔沁沙地生态系统健康状态较为困难,在短时间内难以实现。

(2) 由于国内外还没有统一的沙地生态系统健康诊断的指标体系与标准,本文依据巴林右旗的实际情况,参考其他研究者对该方法的应用,对科尔沁沙地生态系统健康状态进行了诊断,其诊断结果虽可判断科尔沁沙地生态系统健康的变化情况,但由于缺少地面植被调查,针对具体年份诊断结果精度需进一步提高。下一步研究中将加强野外实地调查,生态系统健康指标增加退化种、优势种等各项指标,使生态系统健康诊断结果更加符合实际。因此,随着诊断指标体系的不断改进和完善,沙地的自然演变、人类对沙地生态系统健康期望值的改变及对其科学认知的加深,科尔沁沙地生态系统健康诊断也会更加准确^[19]。

(3) 为促使沙地生态系统的恢复,实现生态系统的健康发展,提出一些行之有效的途径:以自然恢复为主^[20],但仍需人工辅助;在保护原有植被基础上,对土地进行规划管理,实施人工封育,科学的进行人工或机械播种固沙抗旱植物;实施牧场承包到户,责任到人,产权稳定,对于公共牧场制定一系列较为完善的“禁牧、轮牧、休牧”的管理办法;对局部沙化严重区,实施生态移民,将人畜立即迁出,使人沙矛盾得到缓解^[21];以养殖业为基础,发展提供产品、创新特色、优质加工、扩大销路的一体化经济发展模式,提高农牧民的经济

水平,改善以破坏环境求得发展的落后模式。

参考文献:

[1] 平春. 科尔沁沙地典型区生态安全研究以科左后旗为例[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2007.

[2] 乌兰图雅. 科尔沁沙地近 50 年的垦殖与土地利用变化[J]. 地理科学进展,2000,19(3):273-278.

[3] 李金亚. 科尔沁沙地草原沙化时空变化特征遥感监测及驱动力分析[D]. 北京:中国农业科学院,2014.

[4] Rapport D J. What constitutes ecosystem health[J]. Perspectives in Biology and Medicine, 1989,33(1):120-132.

[5] 范荣亮,苏维词,张志娟. 生态系统健康影响因子及评价方法初探[J]. 水土保持研究,2006,13(6):82-86.

[6] 孙燕,周杨明,张秋文,等. 生态系统健康:理论/概念与评价方法[J]. 地球科学进展,2011,26(8):887-896.

[7] 孔红梅,赵景柱,姬兰柱,等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报,2002,13(4):486-490.

[8] Shrader-Frechette K S. Ecosystemhealth: A new paradigm for ecological assessmen[J]. Trends in Ecolntion & Evolntion, 1994,9(12)456-457.

[9] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem health: new goals for environmental management[M]. Washington D. C.: Island Press, 1992.

[10] Walz R. Development of Evironmental Indicator System: Experiences from Germany[J]. Environmental Management, 2000,25(6):613-623.

[11] 王雪,杨庆媛,何春燕,等. 基于模型的生态涵养发展型区域土地生态安全评价:以重庆市丰都县为例[J]. 水土保持研究,2014,21(3):170-175.

[12] 罗遵兰,赵志平,孙光,等. 松花江流域湿地生态系统健康评价[J]. 水土保持研究,2015,22(1):105-114.

[13] 胡秀芳,赵军,钱鹏,等. 草原生态安全理论与评价研究[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(4):93-97.

[14] 颜利,王金坑,黄浩. 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J]. 资源科学,2008,30(1):107-113.

[15] 熊勇,赵翠薇. 山地城镇化过程中土地生态安全动态评价研究:以贵阳市为例[J]. 水土保持研究,2014,21(4):195-202.

[16] 刘凌冰,李世平. 西北荒漠地区土地生态安全评价:以酒泉市为例[J]. 水土保持研究,2014,21(4):190-202.

[17] 闫妍,朱教军,颜巧玲,等. 基于遥感和 GIS 方法的科尔沁沙地边界划定[J]. 地理科学,2014,34(1):122-128.

[18] 朱卫红,郭艳丽,孙鹏,等. 图们江下游湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报,2012,32(21):6609-6618.

[19] 杨予静,李昌晓,丽娜,等. 基于 PSR 框架模型的三峡库区忠县汝溪河流域生态系统健康评价[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(1):66-74.

[20] 刘美珍,蒋高明,李永庚,等. 浑善达克退化沙地草地生态恢复试验研究[J]. 生态学报,2003,23(12):2719-2727.

[21] 王涛,陈广庭,董治宝,等. 内蒙古巴林右旗沙漠化治理模式与效益分析[J]. 中国沙漠,2005,25(5):750-756.