

黄土丘陵区纸坊沟流域农业生态安全预警分析

李 芬¹,王继军^{1,2}

(1 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院 水利部 水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】为黄土丘陵区生态安全预警及其建设提供科学依据。【方法】以纸坊沟流域近 70 年代表年份生态安全态势及影响因子的分析为基础,参考压力-状态-响应(PSR)模型建立农业生态安全预警指标体系。运用层次分析法(AHP)和德尔菲法(Delphi)确定指标权重,采用综合指数法计算生态安全质量值,用演化轴解释生态安全预警模式,定量评价该流域 1938~2005 年的农业生态安全状况,并预测 2015 年的发展趋势。【结果】纸坊沟流域 1938 年处于蓝灯区,无需预警;1958 年为黑灯区,需作生态安全恶化速度预警;1975 和 1985 年处于红灯区,需作生态安全较差状态预警;1995 年处于黄灯区,2005 和 2015 年继续向良好方向演化,均不需预警,但从发展趋势来看,预计人口密度于 2020 年左右进入警戒状态。【结论】研究结果与该流域的实际情况相符,该指标体系和生态安全预警模型可以应用于黄土丘陵区。

【关键词】 黄土丘陵区;纸坊沟流域;生态安全;灯号模型;预警分析

【中图分类号】 S181

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)04-0075-08

Pre-warning analysis of agricultural ecology security of the
Zhifanggou Valley in the Loess Hilly region

LI Fen¹, WANG Ji-jun^{1,2}

(1 College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The study provided ecology security pre-warning and security construction with scientific basis in the Loess Hilly region. 【Method】 Based on analysis of ecological security state and impact factors of Zhifanggou valley during 70 years and Press-State-Response(PSR) model, pre-warning index system of agricultural ecology security was established. AHP and Delphi methools were used to determine indicator weight; integrated value of ecology security was calculated by integrated index method; development axis was used to explain five models of ecology security pre-warning; ecological security conditions from 1938 to 2005 were quantitatively assessed and developing tendency in 2015 was predicted. 【Result】 The results indicated that security condition of the Zhifanggou Valley lay in blue light region and there was no need for pre-warning in 1938; and the black light region needed pre-warning of deterioration velocity in 1958; and the red light region needed ill condition pre-warning in 1975 and 1985; and in yellow light region in 1995, it continued to develop in benign state and no need for pre-warning in 2005 and 2015, but with present development tendency, the author predicts peasants population density will be in pre-warning state in 2020. 【Conclusion】 Research results are consistent with concrete condition, and the index system and

* [收稿日期] 2007-09-12

[基金项目] 国家科技支撑项目(2006BAD09B07);国家自然科学基金项目(40771082);中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿项目(SW05102)

[作者简介] 李 芬(1984—),女,山西运城人,在读硕士,主要从事流域生态和生态经济研究。E-mail: lifen0359@yahoo. com. cn

[通讯作者] 王继军(1964—),男,陕西渭南人,研究员,主要从事生态经济研究。E-mail: jjwang@ms. iswc. ac. cn

pre-warning models of ecology security can be used in the Loess Hilly region.

Key words: Loess Hilly region; the Zhifanggou Valley; ecological security; cresset model; pre-warning analysis

生态安全预警早期也称为生态安全预报,它是在生态安全评价的基础上,就区域资源开发利用等人类活动,在一定时期内对生态环境与社会经济协调发展所造成的影响进行分析、预测和警报,是防止区域生态经济系统向无序化发展和进行系统调控的重要途径之一,对提高区域生态风险意识和能力、促进可持续发展、改善区域生态环境具有重大意义^[1-4]。目前,生态安全预警已应用到流域、水环境、绿洲、森林资源、自然保护区、区域农业等方面。国外很多学者分别从不同角度对生态安全预警进行了研究,20 世纪 90 年代初,我国就开始了环境预警方面的研究,并结合地方建设做了大量的实践^[3-6],但将生态经济理论和生态安全预警应用到黄土丘陵区流域层次上的研究至今尚未见报道。为此,本研究以黄土丘陵区纸坊沟流域为例,建立黄土丘陵区流域农业生态安全预警指标体系和预警模型,对该流域 1938~2015 年农业生态安全状况进行定量预警评价与动态趋势分析,并对生态环境恶化或危害变化适时发出警报,以便及时采取措施,调整和促进该流域农业生态经济系统的良性循环。

1 纸坊沟流域生态经济系统演变概况

纸坊沟流域地处黄土丘陵沟壑区第二副区,延河一级支流杏子河下游,隶属陕西省安塞县沿河湾镇^[7],属于暖温带半干旱气候区,流域面积 8.27 km²,包含 2 个行政村中的纸坊沟、寺岷岷、瓦树塌 3 个自然村。沟壑密度 8.06 km/km²,海拔 1 068~1 309 m,年平均气温 8.8 ℃,年平均降雨量 500 mm,降水年际变率大,且年内分配不均,多暴雨,年蒸发量大于 1 463 mm。

依据实地调查和动态监测资料可知^[7-8],1938 年纸坊沟流域人口稀少,人口密度仅 11.4 人/km²,耕垦指数 13.4%,林草茂盛,粮食单位面积产量为 1 449 kg/hm²,生态系统与经济系统协调发展。随着人口的增多及战争的影响,从 20 世纪 40 年代开始开荒种粮,农耕地不断扩大,耕垦指数高达 51.5%,乔灌植被破坏殆尽,余存果树和灌木 3.5 hm²,水土流失极为严重,粮食单位面积产量下降到 416 kg/hm²,形成“越穷越垦,越垦越穷”的恶性循环,生态环境与社会经济发展之间矛盾尖锐。1973 年纸坊沟流域开始水土保持综合规划与治理,以恢

复植被、防止水土流失、建设基本农田为中心,实行山水田林路综合治理,生态环境得到很大改善,农林牧比例不断调整,农业生态经济系统处于不稳定态势。此后,经过“七五”、“八五”、“九五”和“十五”等 20 年的综合治理,生态环境在很大程度上得以修复,经济实力持续提高。2005 年纸坊沟流域林草面积率达到 68.2%,土壤侵蚀模数降到 1 700 t/(km²·a),农林牧比例调整为 1:6.2:3.9,人均基本农田 1.68 hm²,粮食单位面积产量达 4 771 kg/hm²,人均纯收入达到 2 448 元,农业生态经济系统呈现初步良性循环态势。

2 生态安全预警指标体系的构建

2.1 生态安全评价、预测、预警三者的关系

生态安全评价、预测与预警之间有着密切的依存关系,三者关注的核心都是自然经济社会复合生态系统和环境质量的演化和变化。评价是预测的基础,预警的实现建立在评价和一般预测等大量前期工作的基础上,因而前者是后者的基础,后者是前者的深化和发展,三者共同构成认识复合生态系统结构、功能、演化的整体和系列^[9]。

三者的区别主要有:①内涵的广度不同。预警既包括对研究对象过去、现在的评价,也包括对未来状况的趋势预测。②研究重点不同。评价着重于研究对象状况变化及其利弊的大小,预测强调时序的预见性,预警强调调控的超前性。③结果表述不同。评价的取值是一次性静态结论,预测具有一定动态性,主要是预测演化的方向,而预警的取值是动态多维结论,即在时间序列上对演化方向的预测,以及质变、突变的预测等,对特定区域环境和某一生态因子,可作出恶化趋势、恶化状态、恶化速度等若干种预警。

2.2 建立生态安全预警分析的指标体系

构建合理的预警指标体系是进行生态安全评价与预警的前提和基础,其直接影响到预警结果的科学性、可靠性和准确性。

区域农业生态安全预警指标体系的建立应遵循以下原则:(1)生态经济系统的完整性与动态性;(2)层次性;(3)科学性与实用性;(4)敏感性和预测性;(5)定量为主与定性相结合;(6)数据的可行性与可操作性。

由生态安全评价、预测与预警三者的关系,并结合纸坊沟流域近 70 年农业生态经济系统的演变概况可知,该流域生态安全评价指标体系也同样适宜于对该流域的预警分析,形成生态安全预警指标体系和权重分配(表 1)^[10-12]。

表 1 黄土丘陵区流域农业生态安全预警指标体系的层次结构

Table 1 Pre-warning index system of agri-ecology security in valley of the Loess Hilly region

目标层(O) Object layer	准则层(U) Criteria layer	指标层(T) Index layer	指标权重(W _i) Weight
黄土丘陵区流域 农业生态安全预警 Pre-warning of agri- ecology security in valley of the Loess Hilly region (1.000 0)	生态环境(U ₁) Ecological environment (0.395 1)	人口密度(A ₁)Peasants population density	0.034 137
		人均基本农田(A ₂)Average areas of basic farmland	0.029
		年平均降水量(A ₃)Average annual precipitation	0.024 773
		林草面积率(A ₄)Ratio of forest and grass areas	0.166 456
		群落演替阶段(A ₅)Success ional stages of community	0.042 868
		土壤侵蚀模数(A ₆)Soil corrosion modulus	0.097 866
	社会经济(U ₂) Social economy (0.488 7)	人口自然增长率(B ₁)Ratio of natural population growth	0.055 761
		人均粮食产量(B ₂)Per capita output of grain	0.122 713
		人均纯收入(B ₃)Average annual net income of peasants	0.231 693
		农产品商品率(B ₄)Ratio of marketable farm produce	0.039 78
		农村恩格尔系数(B ₅)Engel coefficient of rural residents	0.013 732
		农村劳动力人均受教育年限(B ₆) Average educational levels of rural labor force	0.025 168
	综合功能(U ₃) Integrated function (0.116 2)	农林牧土地利用结构(C ₁) Land use structure of agriculture,forestry and animal husbandry	0.060 075
		粮食单位面积产量潜力实现率(C ₂) Ratio of per unit area yield of grain production potential	0.012 062
		农业产投比(C ₃)Proportion of agricultural regional output-input	0.007 431
		工副业贡献率(C ₄)Proportion of industrial and all kinds of sideline to total income of peasants	0.008 057
		流域农业产业链与资源量相关度(C ₅) Correlation degree of agricultural industrial chain and resources	0.028 585

3 生态安全预警评价模型的建立

3.1 生态安全质量评价

在上述指标体系建立的基础上,首先对各指标属性值进行无量纲化,依据既定的参考标准^[10,13],确定各个指标的分级量化范围,对各代表年份每个指标进行打分,利用公式(1)对所有指标原始数据进行无量纲化^[11]。

设 $X_i(i=1,2,\cdots,17)$ 为指标集, $X_j(j=1,2,3,4,5,6)$, 分别代表 1938, 1958, 1975, 1985, 1995 和

2005 年)为年份集。

根据下式处理原始数据,

$$X_{ij}=W_i\times S_{ij}。$$

(1)

式中: X_{ij} 为各指标归一化值, W_i 为各指标权重, S_{ij} 为打分值。

然后采用综合加权模型公式(2)计算出黄土丘陵区各代表年份农业生态安全综合值,结果见表 2。

$$E_j=\sum_{i=1}^{17}W_i\times X_{ij}。$$

(2)

式中: E_j 为各代表年份生态安全综合值。

表 2 纸坊沟流域近 70 年代表年份的农业生态安全综合值

Table 2 Agri-ecological security integration value of Zhifanggou valley during 70 years

年份 Year	生态环境预警值 Ecological environment	社会经济预警值 Social economy	综合功能预警值 Integrated function	生态安全综合值 Integrated value
1938	3.340 808	1.959 105	0.678 104	5.978 017
1958	0.825 288	1.495 719	0.116 210	2.437 217
1975	1.107 705	1.576 648	0.219 732	2.904 085
1985	1.592 135	2.067 743	0.284 333	3.944 211
1995	2.529 152	2.390 186	0.657 431	5.576 769
2005	3.066 212	2.860 803	0.938 251	6.865 266

3.2 确定各指标及总体预警的警戒线

3.2.1 代表性指标警戒线的确定 农业生态经济系统的状态、结构和功能是由多种要素构成的一个复杂体系,以纸坊沟流域为例,根据各指标权重排序

的高低,从生态环境、社会经济和综合功能 3 方面选取权重比例较大且具有典型代表性的 7 个指标(人口密度、人均基本农田、林草面积率、土壤侵蚀模数、人均粮食产量、人均纯收入和农林牧土地利用结构)

加以分析,确定其警戒线。这 7 个指标的警戒线如下:

(1)根据黄土丘陵区土地承载力,人口密度的警戒线为 80 人/km²。

(2)根据联合国粮农组织(FAO)提出的标准^[14],如果人均基本农田为 0.1 hm²,则人均粮食达到 393 kg,即使出现超出正常年份的自然灾害,也能解决人口的温饱问题。因此,人均基本农田以 0.1 hm² 为警戒线,人均粮食产量以 393 kg 为警戒线。

(3)林草面积率以防止水土流失剧烈发生的下限值 60%为警戒线,土壤侵蚀模数以达到轻度侵蚀时的 2 500 t/(km² · a)为警戒线^[15-16]。

(4)根据不同时期物价指数及其社会发展实况,人均纯收入的警戒线在 1985 年以前为 300 元,1986~2000 年为 650 元,2001 年以后为 2 000 元。

(5)依据黄土丘陵区已有研究成果^[7],计算得到农林牧土地利用结构(农:林牧)的警戒线为 1:

表 3 黄土丘陵区农业生态安全警戒的阈值及状态划分

Table 3 Pre-warning critical value and state of agri-ecological security in the Loess Hilly region				
生态安全等级 Grade	级别状态 State	指示灯 Indicator light	警戒阈值 Threshold value	阈值 EP Critical value
I	恶劣状态 Very bad	黑灯 Black light	[0.00,2.50]	2.50
II	较差状态 Worse	红灯 Red light	(2.50,4.00]	4.00
III	临界状态 Normal	黄灯 Yellow light	(4.00,5.60)	5.00
IV	良好状态 Nice	蓝灯 Blue light	[5.60,7.50)	5.60
V	最佳状态 Perfect	绿灯 Green light	[7.50,9.00]	7.50

在上述划分中,采用了灯号显示这一模型方法,将区间分为黑、红、黄、蓝、绿 5 个状态,其生态经济系统具体特征如下^[5-6]:

黑灯区间:生态经济系统服务功能近乎崩溃。生态经济系统受到严重破坏,结构残缺不全,功能丧失,生态恢复与重建很困难,生态灾害时常发生。

红灯区间:生态经济系统服务功能严重退化。生态经济系统破坏较大,功能退化且不全,受外界干扰后恢复困难,生态灾害间或发生。

黄灯区间:生态经济系统服务功能已有退化。生态经济系统受到一定破坏,结构有变化,但尚可维持基本功能,受干扰后易恶化导致生态灾害。

蓝灯区间:生态经济系统服务功能较为完善。生态经济系统较少受到破坏,结构尚完整,功能尚好,一般干扰下可恢复,生态灾害不大。

绿灯区间:生态经济系统服务功能基本完整。生态经济系统基本未受干扰破坏,结构完整,系统恢复再生能力强,生态灾害少。

3.3 生态安全预警的数学模型

3.3.1 生态安全预警参数的设置 设预警的初始

6.82。

3.2.2 生态安全总体预警警戒线的界定 生态安全预警判别的定量依据是上述计算得出的生态安全综合值,同时参考国内外相关研究结果^[5-6,13],在咨询相关专家和对该流域的生态环境、社会经济发展状况实地调研的基础上,本研究设计了一个 5 级量度标准作为黄土丘陵区农业生态安全预警警度标准,量度值范围为[0.00,9.00],并配以不同颜色的信号灯,可直观形象地显示警报状态(表 3)。

依据黄土丘陵区纸坊沟流域近 70 年农业生态安全态势,并参考熟知该流域状况的多位专家的意见,用各代表年份的资料分析:当生态安全综合值(E_j) ≤ 2.5 时,生态安全状况恶劣,如 1958 年;当 $2.5 < E_j \leq 4$ 时,生态安全状况较差,如 1975 和 1985 年;当 $4 < E_j < 5.6$ 时,生态安全处于临界状态;当 $5.6 \leq E_j < 7.5$ 时,生态安全状况良好,如 1938 和 2005 年,从而得出警戒阈值和阈值(EP)。

年份为 t_1 ,对未来某一年份 t_2 生态安全因子和总体安全状况进行预警,预警时段长为 $\Delta T = t_2 - t_1$;设任意一年生态安全综合值为 $E(t)$,参数 EP 表示生态安全预警警戒线的阈值,参数 ΔEP 表示恶化趋势预警或恶化速度预警时生态安全综合值在时段 Δt 内变化速率的阈值。

3.3.2 生态安全的预警模式 按照预警内涵,将生态安全预警分为以下 5 种模式,下面对这 5 种模型用演化轴加以图示说明^[2,17]。

(1)生态安全不良状态预警。对已处于恶化或对人类活动造成危害的生态环境、社会经济等作出预警,不良状态预警可进一步区分为较差状态预警和恶劣状态预警。

$$E(t) < EP. \tag{3}$$

由表 3 和图 1 可知,当 $E(t)$ 的值位于演化轴 (2.50,4.00] 时,生态安全为较差状态预警,指示灯为红灯,EP=4.00;若干年后,当 $E(t)$ 的值有继续向右滑动趋势,位于演化轴[0,2.50] 时,生态安全为恶劣状态预警,指示灯为黑灯,EP=2.50。

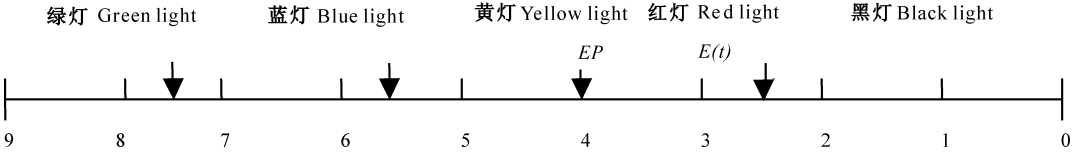


图 1 生态安全不良状态预警示意图

Fig. 1 Ill condition sketch map of ecological security

(2)生态安全恶化趋势预警。对虽未达到恶化或危害程度,但在不采取措施的情况下,开始向恶化或退化方向演化的生态安全状况作出预警。

$\{E(t)<EP,E(t_2)<E(t_1)\}$ 。(4)

由表 3 和图 2 可知,当 $E(t)$ 位于演化轴的 [5. 60,7. 50)时,说明生态安全状况良好,指示灯为

蓝灯;当受干扰在若干年后,生态安全综合值在演化轴上向左滑动到 $E(t_1)$,比 $E(t)$ 较靠近优良状态,指示灯为绿灯, $E(t_1)-E(t)>0$,向最佳方向演化,不必预警;反之,当 $E(t)$ 沿着演化轴向右滑动到 $E(t_2)$ 时,比 $E(t)$ 远离良好状态,指示灯为黄灯, $E(t_2)-E(t)<0$,向不良方向演化,则应该预警。

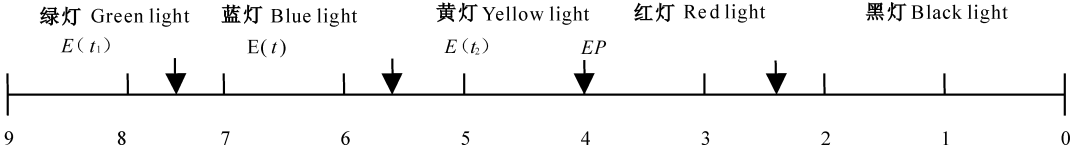


图 2 生态安全恶化趋势预警示意图

Fig. 2 Deterioration tendency sketch map of ecological security

(3)生态安全恶化速度预警。对从比较好或不坏的状态向恶化方向发展,且恶化趋势迅猛,有可能在短时间内达到恶化或危害程度的生态安全状况作出预警。

图 3 显示,设生态安全综合值 $E(t)$ 为 7. 00,说明其生态安全状况良好,指示灯为蓝灯,当人为干预后, $E(t)$ 沿着演化轴向右迅速退化到 $E(t_1)=2. 00$ 位置,指示灯为黑灯,设变化过程仅为 10 年,则说明在不长的时段内生态安全状况急剧恶化,需要作恶化速度预警。

$\{E(t)<EP,E(t_2)<E(t_1),|E(t_2)-E(t_1)|/(t_2-t_1)\geq\Delta EP\}$ 。(5)

式中: $\Delta EP=1/10$,即(1/年); $EP=4. 00$ 。

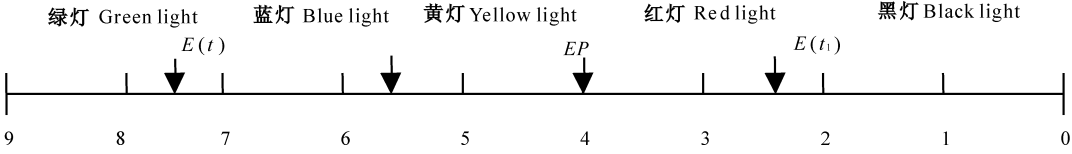


图 3 生态安全恶化速度预警示意图

Fig. 3 Deterioration velocity sketch map of ecological security

(4)生态安全恶化临界点预警。生态安全恶化临界点预警也称生态安全恶化质变预警。若生态安全综合值 $E(t)$ 处于演化轴上的状态临界位置,如 7. 50(绿灯与蓝灯之间),5. 60(蓝灯与黄灯之间),4. 00(黄灯与红灯之间),则人为干扰稍有负向作用,都有可能引起质量等级的变化,这种敏感质量点的状态和趋势,需作恶化临界点预警(图 3)。

4 纸坊沟流域生态安全预警分析

4.1 现状预警评价

(5)生态安全灾变预警。由于生态经济系统自身的灾害性变化或外界人类活动等影响因素引起生态安全状况在短时间内进入警戒状态。如森林火灾、洪水、泥石流、剧毒药品泄漏等可在短时间内对一个系统造成毁灭性破坏,因此需作生态安全灾变性预警。

选取具有典型代表性的 7 个指标,从生态环境、社会经济和综合功能 3 方面对纸坊沟流域农业生态安全现状(2005 年)进行预警分析,结果见表 4。由表 4 可以看出,影响因子中除人口密度负向变化外,其余都为正向演变,都解除警戒状态,但人口不断增加导致人口密度逐渐增大,即将进入恶化趋势预警;农林牧土地利用结构不断调整而趋于完善,耕地面积逐渐稳定在适宜范围,林草植被面积增加,土壤侵蚀模数下降,人均粮食产量提高,人均纯收入增加等,结合表 2 和表 3 分析可知,目前该流域农业生态

安全总体处于良好状态,但还应该适度地控制人口数量。

表 4 纸坊沟流域生态经济系统各指标的现状预警评价(2005 年)

Table 4 Pre-warning assessment of main indexe of the Zhifanggou Valley eco-economic system in 2005

影响因子 Impact factors	主要指标 Main indexes	当前值(X) Present value	警戒线(XP) Pre-warning demarcation line	(X-XP)	变化方向 Change direction	变化原因 Cause	对人类利弊 Advantage and disadvant age to human	发警报标准 Standard	是否进入 警戒状态 Yes or no
人口 Population	人 口 密 度/ (人·km ⁻²) Peasants pop- ulation density	64.6	80	-15.4	-	人为 Artificial	有害 Bad	>0	否 No
耕地 Cultivated land	人均基本农 田/hm ² Average are- as of basic farmland	0.126	0.1	+0.026	+	人为 Artificial	有益 Good	<0	否 No
植被 Vegetation	林 草 面 积 率/% Ratio of forest and grass areas	68.2	60	+8.2	+	自然与人为 Nature and artificial	有益 Good	<0	否 No
土壤 Soil	土壤侵蚀模 数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) Soil corrosion modulus	1 700	2 500	-800	+	人为与自然 Nature and artificial	有益 Good	>0	否 No
社会经济 Social economy	人均粮食 产量/kg Per capita output of grain	419.9	393	+26.9	+	人为 Artificial	有益 Good	<0	否 No
	人均纯收入/ 元 Average annual net income of peasants	2 395	2 000	+395	+	人为 Artificial	有益 Good	<0	否 No
综合功能 Integrated function	农林牧土地 利用结构 Land use structure	1 : 10.1	1 : 6.82	+	+	人为与自然 Nature and artificial	有益 Good	<0	否 No

4.2 趋势预警评价

从近 70 年纸坊沟流域生态经济系统演变过程中,选取以下具有代表性的年份加以分析:民国初年的 1938 年、建国初期的 1958 年、改革开放前的 1975 年、以及改革后的 1985 和 1995 年、代表当前的 2005 年、同时预测 10 年后 2015 年的生态安全状况。将各个主要代表性指标在各代表年份的实际值及趋势值与其相应的警戒线进行对比,并进行简要的评价,结果见表 5。由表 5 可以看出,人均基本农田、林草面积率、土壤侵蚀模数这 3 个因子在 1938 年均未处于警戒状态,但从 1958 年左右进入警戒状态,其中,人均基本农田 1995 年左右警戒状态解除,林草面积率和土壤侵蚀模数于 2005 年左右解除警戒;人均纯收入从 1938 年到 1975 年左右处于警戒状态,1985 年左右解除警戒;人均粮食产量从 1995 年左右进入警戒状态,2005 年左右解除警戒;农林牧土地利用结构从 1938 年到 1995 年左右大部分时间处于警戒状态,2005 年左右解除警戒;人口密度从 1938 到目前从未进入警戒状态,但按照目前变化

规律,未来很有可能进入警戒状态;人均粮食产量趋于稳定略有增加,其他各项指标按现有趋势,今后不会进入警戒状态。

4.3 总体状况预警评价

根据生态安全的 5 种预警模式,并结合表 2 和表 3 分析纸坊沟流域生态安全总体预警状况,结果表明,该流域近 70 年农业生态安全基本处于预警状态,但在生态经济系统演变的不同阶段其警情、警源和警度存在着不同程度的差异。1938 年和 2005 年该流域生态安全均处于良好状态,指示灯为蓝灯;1958 年 $E(t)$ 值由 1938 年的 5.978 017 急速降低到 2.437 217,指示灯为黑灯,根据公式(5)计算得出恶化值为 $0.177\ 05 \geq \Delta EP$,此时需要作生态安全恶化速度预警;1975 年和 1985 年的 $E(t)$ 值分别为 2.904 085 和 3.944 211,指示灯为红灯,由预警模式一, $E(t) < EP$, $EP = 4.00$ 可知,这两阶段应作生态安全较差状态预警;1995 年 $E(t) = 5.576\ 769$,指示灯为黄灯,由预警模式二可知,此时为正影响,向良好方向演化,则不必预警;2005 年 $E(t) =$

6.865 266,并预测未来 10 年 $E(t)$ 值不断增大,逐渐 稳定朝着良好方向演化,此时也无需预警。

表 5 纸坊沟流域农业生态安全的趋势预警评价

Table 5 Tendency pre-warning assessment of agri-ecological security of the Zhifanggou Valley

类别 Sort	代表性指标 Main indicators	年份 Year						趋势 变化 Trand of change	未来 Future 2015	
		1938	1958	1975	1985	1995	2005			
生态环境 Ecological environ- ment	人口密度 Peasants popu- lation density	实际值/(人·km ⁻²) Actual value	11.4	26.7	46.3	50.4	66	64.6	增大 Increase	68.3
		警戒线/(人·km ⁻²) Pre-warning demarcation line	80	80	80	80	80	80		80
		是否警戒状态 Pre-warning state	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	否 No	接近 Near	否 No
	人均基本农田 Average areas of basic farmland	实际值/hm ² Actual value	0.1	0.04	0.0547	0.088	0.16	0.112	趋于稳 定 Near steady	0.14
		警戒线/hm ² Pre-warning demarcation line	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		0.1
		是否警戒状态 Pre-warning state	否 No	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	解除 Down	否 No
	林草面积率 Ratio of forest and grass area	实际值/% Actual value	76.5	0.43	8.65	24.79	45.63	68.2	先降后 增 Re- duce and increase	70
		警戒线/% Pre-warning demarcation line	60	60	60	60	60	60		60
		是否警戒状态 Pre-warning state	否 No	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	解除 Down	否 No
	土壤侵蚀模数 Soil corrosion modulus	实际值/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) Actual value	<1 000	>20 000	18 000	125 000	3 500	1 700	先增后 降 In- crease and reduce	1 500
		警戒线/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) Pre-warning demarcation line	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500		2 500
		是否警戒状态 Pre-warning state	否 No	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	解除 Down	否 No
社会经济 Social economy	人均粮食产量 Per capita output of grain	实际值/kg Actual value	1 638	769.2	499.2	416	370.1	419.9	趋于稳 定 Near steady	450
		警戒线/kg Pre-warning demarcation line	393	393	393	393	393	393		393
		是否警戒状态 Pre-warning state	否 No	否 No	否 No	否 No	是 Yes	否 No	解除 Down	否 No
	人均纯收入 Average annual net income of peasants	实际值/元 Actual value	<300	<300	<300	309	1 657	2 395	增多 Increase	2 800
		警戒线/元 Pre-warning demarcation line	300	300	300	300	650	2 000		2 000
		是否警戒状态 Pre-warning state	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	否 No	否 No	解除 Down	否 No
综合功能 Integrated function	农林牧土地 利用结构 Land use structure	实际值 Actual value	1:5.72	1:0.71	1:1.06	1:1.38	1:3.88	1:10.1	先降后 增 Re- duce and increase	1:8.95
		警戒线 Pre-warning demarcation line	1:6.82	1:6.82	1:6.82	1:6.82	1:6.82	1:6.82		1:6.82
		是否警戒状态 Pre-warning state	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	是 Yes	否 No	解除 Down	否 No

注:2015 年预测数值利用 SPSS12.0 软件中的多元回归线形模型方法预测。
Note:Predicted values in 2015 were calculated by multivariate regression linear model of SPSS12.0 software.

5 结论与讨论

1)利用本研究所建立的黄土丘陵区流域农业生态安全预警指标体系和预警模型,分析纸坊沟流域各具体指标及总体的生态安全预警状况,结果表明,总体上,1938 年处于蓝灯区,无需预警;1958 年为黑

灯区,需作生态安全恶化速度预警;1975 和 1985 年处于红灯区,需作生态安全较差状态预警;1995 年处于黄灯区,2005 年继续向良好方向演化,恢复到蓝灯区,均不需预警。但就各代表性指标而言,从目前发展趋势来看,除人口密度外,今后均不会再进入警戒状态;若目前不采取控制人口措施,预计人口密

度于 20 年左右进入警戒状态。这一状况与该流域的实际情况相符,说明这一指标体系和生态安全预警模型可以应用于同类型区。

2)本研究以纸坊沟流域为例,建立了一套适用于黄土丘陵区的区域生态安全预警指标体系和预警模型,通过对该流域的实证分析,对可能出现的生态环境、社会经济危机作出警报,并涵盖了对生态安全的维护,为黄土丘陵区农业生态安全管理和区域农业可持续发展战略的制定提供了科学依据,可供黄土丘陵区同类型区区域生态安全预警参考。

[参考文献]

[1] 曹新向. 旅游地生态安全预警评价指标体系与方法研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(3): 39-43.
Cao X X. A study on ecological security alarm assessment of tourism destination [J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(3): 39-43. (in Chinese)

[2] 陈国阶, 何锦峰. 生态环境预警的理论和方法探讨[J]. 重庆环境科学, 1999, 21(4): 8-11.
Chen G J, He J F. An approach on the theory and methodology of ecological and environmental warning [J]. Chongqing Environmental Science, 1999, 21(4): 8-11. (in Chinese)

[3] 胡淑恒. 巢湖流域的生态安全预警研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
Hu S H. A study on ecological security pre-warning of Chaohu valley [D]. Hefei: Hefei Industry University, 2004. (in Chinese)

[4] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用[J]. 应用生态学报, 1993, 4(4): 436-439.
Fu B J. Early warning theory on regional eco-environmental issues and its application [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(4): 436-439. (in Chinese)

[5] 彭煜, 文传浩. 脆弱农业区域生态安全预警指标体系研究[J]. 贵州财经学院学报, 2004(6): 6-9.
Peng Y, Wen C H. A study of the forewarning index system for ecological security in vulnerable agricultural regions [J]. Journal of Guizhou College of Finance and Economics, 2004(6): 6-9. (in Chinese)

[6] 文传甲. 三峡库区农业生态经济系统的预警分析[J]. 山地研究, 1998, 16(1): 13-20.
Wen C J. Forewarning analysis of agricultural ecological economic system for Three-Gorge Reservoir Region [J]. Mountain Research, 1998, 16(1): 13-20. (in Chinese)

[7] 安塞水土保持综合试验站. 黄土丘陵沟壑区水土保持型生态农业研究(上册)[M]. 西安: 天则出版社, 1990: 1-21, 40-41.
Ansai Comprehensive Research Station. Studies on ecological agriculture with soil and water conservation in Loess Hilly Gully Region (Vol. 1) [M]. Xi'an: Tianze Press, 1990: 1-21, 40-41. (in Chinese)

[8] 卢宗凡, 梁一民, 刘国彬. 中国黄土高原生态农业[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 15-16.

Lu Z F, Liang Y M, Liu G B. Studies on ecological agriculture with soil and water conservation in Loess Hilly Gully Region [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997: 15-16. (in Chinese)

[9] 陈国阶. 对环境预警的讨论[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(5): 1-4.
Chen G J. Discuss of environmental pre-warning [J]. Chongqing Environmental Science, 1996, 18(5): 1-4. (in Chinese)

[10] 左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 67-71.
Zuo W, Wang Q, Wang W J, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard [J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(1): 67-71. (in Chinese)

[11] 王继军, 郑科, 郑世清, 等. 中尺度生态农业建设效益评价指标体系研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 243-247.
Wang J J, Zheng K, Zheng S Q, et al. The index system of reviewing effects of ecological agriculture construction in the medium scale areas [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2000, 7(3): 243-247. (in Chinese)

[12] 曾建权. 层次分析法在确定企业家评价指标权重中的应用[J]. 南京理工大学学报, 2004, 2(1): 99-104.
Zeng J Q. Application of analytic hierarchy process to determining entrepreneur evaluation index weight [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2004, 2(1): 99-104. (in Chinese)

[13] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴(1989~2006)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990~2007.
Statistical Bureau of Shaanxi Province. Statistical yearbook of Shaanxi (1989—2006) [M]. Beijing: China Statistics Press, 1990—2007. (in Chinese)

[14] 吴文盛, 朱军, 郝志军. 耕地资源的安全评价与预警[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(5): 46-49.
Wu W S, Zhu J, Hao Z J. An evaluation and prediction on the safety of cultivated land resources [J]. Area Research and Development, 2003, 22(5): 46-49. (in Chinese)

[15] 张晓萍, 刘静, 李锐. 基于 RS 和 GIS 的纸坊沟流域土地利用动态监测及分析[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 115-121.
Zhang X P, Liu J, Li R. Dynamic monitoring and analysis of land use based on RS and GIS in Zhifanggou watershed [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(4): 115-121. (in Chinese)

[16] 武春龙, 江忠善, 郑世清. 安塞县纸坊沟流域土壤侵蚀类型遥感制图[J]. 水土保持通报, 1990, 10(4): 6-12.
Wu C L, Jiang Z S, Zheng S Q. The remote sensing mapping of soil erosion type in Zhifanggou watershed, Ansai contry [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(4): 6-12. (in Chinese)

[17] 陈治谏, 陈国阶. 环境影响评价的预警系统研究[J]. 环境科学, 1992, 13(4): 20-26.
Chen Z J, Chen G J. Study on pre-warning system of environment and assessment [J]. Environmental Science, 1992, 13(4): 20-26. (in Chinese)