

陇中半干旱区生态环境恢复重建与农牧业发展仿真研究

张汉雄^{1, 2}, 上官周平¹

(1. 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

2. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:应用系统动力学理论建立了陇中农牧交错带生态环境恢复重建的 SD 模型, 对该区的三种典型治理模式—综合治理型、农牧协调发展型和传统经营型, 用该模型仿真研究了 2000~2080 年的生态系统发展趋势。结果表明: 农牧协调发展模式可使农牧业协调持续发展, 土壤侵蚀量减少 76.1%, 生态环境稳步趋向良性循环, 它是该区生态环境治理与农牧业持续发展的最佳模式。

关键词: 陇中半干旱区; 生态环境; 恢复重建; SD 模型; 发展模式; 仿真研究

中图分类号: X14 X322

文献标识码: A

陇中半干旱区是指兰州以东、陇山之西、秦岭以北的陇中黄土丘陵区, 是黄土高原向干旱荒漠的过渡地带, 属典型的农牧交错带, 总面积 37 129 km², 2000 年总人口 581.34 万人, 农村人口 517.83 万人, 人口密度 139.5 人/km²。应用系统动力学(SD)模型仿真研究这一区域的生态环境恢复重建, 对促进该区的农牧业发展有重要的现实意义。

1 陇中半干旱区生态环境及演变特点

1.1 气候干旱、水资源匮乏

该区气候属典型的半干旱气候, 多年平均雨量 251~556 mm, 由东南向西北递减, 蒸发量 1 250~1 950 mm, 雨量年际年内分配不均, 7~9 月雨量约占全年的 70%。绝大部分地区为雨养农业, 水土流失严重, 降水利用率低, 地表水、地下水资源均十分匮乏。干旱、低温、霜冻、冰雹、干热风等自然灾害频繁, 制约当地农牧业发展。

1.2 植被稀少、生态环境脆弱

由于历史上长期乱砍滥伐, 过度耕垦, 天然林已荡然无存, 仅保留着荒漠草原和灌木, 人工林主要分

布在沟谷地带。森林盖度仅 1.5%~4.7%, 植被盖度仅 15%~22.5%, 生态环境十分脆弱。人工林发展缓慢, 华家岭一线的梁顶坡面, 50 a 前栽植的杨树林大都变为“小老头”树, 且不断老化或枯死。土壤侵蚀使地带性草原植被退化为荒漠植被, 仅残存于梁峁沟坡地埂。加之农村燃料短缺, 砍伐林木植被烧柴现象严重, 植被资源仍在不断枯竭衰退。

1.3 地形复杂、水土流失严重

该区地势由东南向西北逐渐升高, 中东部为沟壑密布的黄土丘陵, 西北部为高原台地, 山、丘、塬交错, 地形起伏大。水土流失面积 33 193 km², 占总面积的 89.4%。由于植被稀少, 黄土易侵蚀, 加之耕垦强烈, 水土流失严重。坡耕地及沟坡谷侵蚀强烈, 侵蚀模数在 7 000~8 500 t/km²·a⁻¹, 荒山坡和缓坡农地侵蚀严重, 侵蚀模数在 4 000~6 000 t/km²·a⁻¹。

1.4 掠夺式经营, 不合理利用土地, 制约农牧业发展

由于长期实行倒山轮种、广种薄收、超载放牧、乱砍滥伐等掠夺式经营, 形成“愈垦愈穷, 愈穷愈垦”的恶性生态经济循环。农业人均耕地 2~5 hm², 主要是坡地。耕地占总土地 45%~60%; 林地仅占约

收稿日期(Received date): 2002—06—06; 改回日期(Accepted): 2003—08—10。

基金项目(Foundation item): 国家 973 项目(2002CB111502)资助。[Supported by the National Key Project for Basic Research and Development Plan (2002CB111502)].

作者简介(Biography): 张汉雄, 1945 年生, 高级工程师, 主要从事水土保持、恢复生态学与生态环境研究, 出版著作 2 部, 发表论文 80 多篇。[Zhang Han-xiong, male, born in 1945, Senior engineer. Research fields mainly covering soil and water conservation, restoration ecology and environment in loess region, has published more than 80 papers. Tel: 029—7012787]

5%~8%, 牧地约占 7%~15%, 土地利用结构极不合理。秦安、甘谷等县人口密度达 350 人/km², 耕垦十分强烈, 坡地粮食单产仅 750~1 050 kg/hm², 草场载畜量仅 0.75~1.05 羊单位/hm², 土地生产力低。干旱使作物减产, 粮食产量大起大落, 牧业急剧剧衰, 农牧业发展缓慢, 农村经济贫困, 结构单一, 调控能力差, 制约农牧业发展。

该区脆弱生态环境的形成演变与人为活动密切相关, 合理利用资源可持续发展; 反之, 将导致资源枯竭和环境退化; 故生态系统的良性循环应是人口、资源、环境、经济协调发展。因此, 应用系统动力学 (System Dynamic 简称 SD) 理论^[1] 和反馈控制理论^[2] 建立可调控的该区生态系统 SD 模型, 研究生态环境恢复重建与农牧业发展的策略与调控途径。

2 生态环境恢复重建与农牧业发展 SD 模型

该区农业生态经济系统 SD 模型含 152 个变量和 135 个参数, 系统关系集合可表示为

$$\pi(S) = \{A_1, A_2, \dots, A_m\} \quad (1)$$

系统单元间建立的关系记作 R , 则 $R(\pi)$ 是 $\pi(S)$ 在 R 上诱导的关系划分, 即

$$R(\pi) = \{R_{ij} | R_{ij} \subseteq A_i \times A_j, i, j = 1, 2, \dots, m\} \quad (2)$$

其 α 映射关系 $A_i \longrightarrow Q_i (Q_i \subseteq SD)$

和 β 映射关系 $R_{ij} \longrightarrow R_{ij}^* (R_{ij}^* \subseteq Q_i \times Q_j), i, j = 1, 2, \dots, m$

$$\text{则 } \pi(SD) = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_m\} \quad (3)$$

$$R^*(\pi) = \{R_{ij}^* | R_{ij}^* \subseteq Q_i \times Q_j, i, j = \dots, m\} \quad (4)$$

式中 A_i 为子系统单元集; Q_i 为子系统变量集; R_{ij} 为不同集合间的相互关系; m 为变量数。

系统中变量集合关系按类型划分为种植业、林果业、牧业、农村经济、土壤侵蚀与水土保持、人口、农业资源与生态环境 7 个子系统 (模块), 相互作用, 相互依赖和制约, 保持动态平衡。对该区生态系统诊断分析表明: 系统中存在复杂的正、负反馈关系, 形成多重反馈机制, 牵一发而动全局。主要通过人口、土地、粮食、饲草、燃料、水土流失与治理等物流回路, 产生自调节机制, 在增长、衰减、振荡中保持动态相对平衡, 稳定发展。

该 SD 模型含 21 个状态方程、42 个流率方程、91 个辅助方程, 主要模块功能及 DYNAMO 方程为:

(1) 种植业模块 预测耕地、粮田、经济作物面积、粮食产量供需平衡。主要方程为

$$L \quad FAD^\circ K = FAD^\circ J + DT * (FADI^\circ JK - FADR^\circ JK)$$

$$R \quad FADI^\circ KL = RAA^\circ KL + RAB^\circ KL + RAC^\circ KL$$

$$R \quad FADR^\circ KL = RBA^\circ KL + RBB^\circ KL + RBC^\circ KL$$

$$L \quad GRL^\circ K = GRL^\circ J + DT * CRLR^\circ JK$$

式中 FAD 、 RAA 、 RAB 、 RAC 分别为耕地、垦荒、果树减少、种草复耕面积; RBA 、 RBB 、 RBC 分别为非生产地占用耕地面积、退耕建果园和退耕种草面积, GRL 为粮食播种面积。 $FADI$ 、 $FADR$ 为耕地增加、减少面积, $CRLR$ 为粮食播种面积变化率。

(2) 林业模块 协调乔木、灌木、果树面积的发展, 预测果产量、蓄积量, 主要方程

$$L \quad FORA^\circ K = FORA^\circ J + DT * (FORAI^\circ JK - FORAR^\circ JK - FORAE^\circ K)$$

$$L \quad FORB^\circ K = FORB^\circ J + DT * (FORAR^\circ K - SOT^\circ J / m_{10})$$

$$R \quad FORAI^\circ KL = (FORA^\circ K + FORB^\circ K) * CLIP(0, P1, FORA^\circ K + FORB^\circ K, 0.67 * V67)$$

$$L \quad SOT^\circ K = SOT^\circ J + DT * (SOTI^\circ J - SOT^\circ J / m_{12})$$

$$R \quad SOTI^\circ KL = 0.12 * FORB^\circ K + 0.05 * FORA^\circ K$$

式中 $FORA$ 、 $FORB$ 分别为幼林和中成林面积; $FORAR$ 是转移面积, $FDRAI$ 为造林面积, $FORAE$ 为幼林破坏面积; $P1$ 为造林速率, $V67$ 为宜林面积, SOT 为木材蓄积量, $SOTI$ 为生长量, m_{12} 为采伐周期。

(3) 牧业模块 预测各类草场面积、饲草供需平衡和载畜量发展, 主要方程为

$$L \quad BRE^\circ K = BRE^\circ J + DT * (BREI^\circ JK - BRER^\circ JK)$$

$$R \quad BREI^\circ KL = m_{16} * (GRS^\circ K - GRO^\circ K) / m_{17}$$

$$L \quad GRD^\circ K = GRD^\circ J + DT * (GRDI^\circ JK - GRDR^\circ JK)$$

$$R \quad GRDI^\circ KL = GRD^\circ K * CLIP(0, CLIP$$

$(P_4, 0.7 * P_4, RBC \circ KL, GRDR \circ KL), V25 \circ K, 2.0)$

式中 GRS 为总饲草供给; BRE 、 $BREI$ 、 $BREI$ 分别为载畜量、牲畜繁殖数和出栏数; GRO 为饲草消耗量; m_{16} 、 m_{17} 分别为草增量、食草标准系统; GRD 为种草面积, P_4 为种草发展速度。

(4) 土壤侵蚀与保持模块 预测各类侵蚀面积、侵蚀量的发展动态变化。主要方程为

$$L \quad SWA \circ K = SWA \circ J + DT * (FORDR \circ JK + GRDR \circ JK - SRA \circ JK)$$

$$R \quad SRA \circ KL = SWA \circ K * TABHL (TP10FAD \circ K, 0, 1, 0.2) - RBA \circ KL - m_{65} * SWA \circ K$$

$$L \quad SWB \circ K = SWB \circ J + DT * (SRA \circ JK + NUDR \circ JK - SWBR \circ JK - GRDI \circ JK - FORAI \circ JK - FORCI \circ JK)$$

$$R \quad SWBR \circ KL = m_{66} * SWB \circ K * TABHL (TP11, RAA \circ KL, 0, 100, 10)$$

$$L \quad SWC \circ K = SWC \circ J + DT * (SWBR \circ JK - (HYDI \circ JK - FORAR \circ JK - FORDI \circ JK - RBB \circ JK) * m_{67})$$

$$L \quad SOL \circ K = SOL \circ J + DT * (SOLI \circ JK - SOLR \circ JK)$$

式中 SWA 、 SWB 、 SWC 分别为轻度、中度和强度流失面积; SRA 、 $SWBR$ 分别为轻度向中度, 中度向强度转移面积; m_{66} 、 m_{65} 为转移速率; m_{67} 为治理措施保存率; SOL 为土壤流失总量; $GRDI$ 、 $GRDR$ 为种草增加、减少面积; $FORDI$ 、 $FORDR$ 为果树增加、减少面积; $FORCI$ 为灌木增加面积; $HYDI$ 为新修梯田面积; $NUDR$ 为非产地减少面积, FP_{10} 、 TP_{11} 为表函数, 其它符合意义同前。

该 SD 模型用 PD (Professional DYNAMO) Plus 软件在 PC 计算机上运行, 采用龙格-库塔法进行积分运算。仿真初始时间为 2000 年, 终止时间 2080 年, 步长 1 a。用仿真结果的 140 对状态指标与实际系统比较, 模型的有效性为 91.5%, 可用于未来仿真预测。

3 三种生态环境治理模式的仿真结果分析

3.1 农业发展与生态环境治理模式

陇中半干旱区生态环境脆弱, 为合理利用农业

自然资源, 改善生态环境, 促进区域持续发展。通过综合分析, 选择三种典型的发展模式^[3]进行仿真研究, 以优选治理策略, 即:

A 综合治理型 该模式以控制水土流失和改善生态环境为目标, 加速治理, 大力发展梯条田等基本农田, 促坡地退耕还林草, 使土壤侵蚀减至最小, 并确保粮食产量稳定增长, 满足自给, 人均粮食达到 350 kg。发展灌草结合的防护林, 适度发展果树, 建设防护型生态林业。

B 农牧协调发展型 该模式以合理利用土地、促进水土保持综合治理为目标, 根据农村经济发展状况, 逐步加速治理。种草养畜, 以牧促农, 农、牧业循序渐近地协调发展。退耕与造林种草养畜同步, 提高各类土地生产力, 逐步实现生态-经济良性循环。

C 传统经营型 该模式维持“以粮为纲, 以放牧为主”的粗放经营方式, 粮食生产较快发展, 水土保持治理缓慢。主要为预测生态环境恶化的演变趋势和对农林牧业发展的影响。

仿真预测三种模式的农林牧业经济及土壤侵蚀发展动态见表 1~3 和图 1~3。

3.2 综合治理模式的系统发展动态

该模式加速发展乔灌结合的防护林, 林地可持续增加到 $73.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 增加 3 倍以上, 由于立地条件限制, 林地盖度最大为 19.81%, 其中灌木和乔木各占一半, 果树面积增加 2 倍, 林种结构趋于合理。耕地将逐步减少, 初期退耕速度每年 $3.48 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 逐年递减, 大约在 2050 后停止退耕, 人均耕地 0.247 hm^2 , 梯田 0.2 hm^2 , 满足粮食生产需要。牧地呈增加-减少趋势, 天然草场和退化草场面积呈递减趋势, 而人工种草面积则较快增长, 达到人均 0.19 hm^2 , 2050 年总载畜可达 808.6 万羊单位, 比现状增长 1.5 倍 (见图 2)。农、林、牧用地之比约为 10.8:1.5, 体现了发展农牧业的资源优势。粮食产量稳定增加, 人均占有粮稳定在 350 kg 左右, 保持余粮 $23 \sim 27 \times 10^4 \text{ t}$ 。2050 年后生态环境有明显改善, 确保农业资源的永续利用。

3.3 稳步协调发展模式的土地利用与农林牧业发展

该模式的土地利用发展动态介于 A 模式与 C 模式之间, 耕地面积和粮食产量与 A 模式较接近。牧地面积近期略有增加, 后期稍减少, 种草稳步发展, 载畜量稳定增加。林业发展稳步增长, 林盖度最大达 19.8%, 生态环境有较显著改善 (见表 1~2), 农林牧业稳步发展。

表 1 人口与土地利用发展动态
Table 1 The dynamic trend of population and land use

模式	年份	总人口 (万人)	农业人口 (万人)	各类用地面积(× 10 ⁴ hm ²)					梯条田 (× 10 ⁴ hm ²)	农业人均(hm ² / 15)		农业产值 (亿元)
				耕地	林地	牧地	未利用地	非生产地		耕地	基本农田	
基期	2000	581. 34	468. 45	142. 32	17. 05	116. 35	77. 14	19. 44	26. 60	4. 56	0. 85	24. 03
A	2020	671. 85	442. 80	119. 63	28. 49	147. 37	51. 49	24. 31	64. 66	4. 05	2. 19	26. 79
	2040	699. 23	427. 59	110. 56	41. 77	153. 83	34. 38	30. 74	68. 65	3. 88	2. 41	30. 52
	2080	684. 90	388. 67	95. 70	73. 56	143. 02	15. 32	43. 68	77. 39	3. 69	2. 99	44. 17
B	2020	671. 85	442. 80	124. 27	28. 55	142. 66	51. 50	24. 31	72. 32	4. 21	2. 45	35. 30
	2040	699. 23	427. 59	112. 76	42. 01	151. 40	34. 38	30. 74	77. 76	3. 96	2. 73	41. 77
	2080	684. 90	388. 67	92. 87	73. 87	172. 35	15. 32	43. 68	87. 66	3. 58	3. 38	45. 96
C	2020	671. 85	442. 80	136. 37	24. 34	134. 77	51. 49	24. 31	70. 69	4. 62	2. 39	42. 87
	2040	699. 23	427. 59	134. 91	30. 75	140. 50	34. 38	30. 74	80. 63	4. 73	2. 83	48. 86
	2080	684. 90	388. 67	118. 04	39. 22	155. 02	15. 32	43. 68	91. 55	4. 56	3. 53	52. 88

表 2 三种模式的农林牧业发展动态
Table 2 The change trend of farming, forestry and animal husbandry for three patterns

模式	年份	粮田面积 (× 10 ⁴ hm ²)	粮食总产 (× 10 ⁴ t)	总人均粮 (kg)	粮余缺 (× 10 ⁴ t)	林种面积(× 10 ⁴ hm ²)			木材蓄积 (× 10 ⁴ m ³)	草场面积(× 10 ⁴ hm ²)			载畜量 (万羊单位)
						乔木	灌木	果园		天然草场	人工草场	退化草场	
基期	2000	78. 07	149. 90	257. 9	— 24. 89	10. 34	5. 72	1. 09	353. 9	137. 93	8. 42	91. 43	557. 7
A	2020	88. 10	208. 8	310. 8	— 2. 57	16. 85	9. 91	1. 73	617. 5	135. 91	11. 46	85. 09	540. 1
	2040	88. 17	250. 1	357. 6	19. 45	23. 97	15. 58	2. 22	1045. 0	135. 41	18. 42	60. 23	631. 4
	2080	67. 86	238. 0	347. 4	8. 29	36. 22	34. 41	2. 94	2127. 1	86. 44	56. 58	12. 98	808. 6
B	2020	92. 92	223. 0	332. 0	8. 89	16. 85	9. 91	1. 79	617. 5	126. 37	16. 29	83. 72	559. 7
	2040	84. 89	245. 1	350. 5	15. 79	23. 97	15. 58	2. 45	1045. 0	116. 00	35. 41	48. 72	696. 7
	2080	64. 63	232. 1	338. 9	3. 82	36. 22	34. 41	3. 25	2127. 1	100. 00	72. 35	14. 83	957. 7
C	2020	117. 36	281. 7	419. 2	50. 64	24. 34	8. 55	1. 51	594. 0	134. 77	6. 94	102. 05	542. 7
	2040	114. 92	334. 8	478. 8	79. 59	30. 75	11. 81	1. 94	905. 8	140. 50	6. 55	122. 77	605. 7
	2080	87. 46	318. 4	464. 9	65. 71	39. 22	20. 60	2. 57	1367. 2	155. 02	5. 84	132. 5	606. 0

3.4 传统经营模式发展动态仿真分析

该模式农林牧业用地基本上变化不大,造林和退耕速度缓慢。2050 年耕地仅减至 134. 9× 10⁴ hm², 占总土地的 34. 6 %, 农业人均耕地 0. 315 hm²。林地增长幅度不大,后期稍有减少,森林盖度最大为 10. 6 %。牧地持续增加,最大达 155. 0× 10⁴ hm², 占总土地的 41. 8%。农、林、牧用地之比约为 1 :0. 33 :1. 31。粮食产量增长较大,人均粮可达 466 kg, 余粮较多。由于造林发展慢,林木蓄积量后期为减少趋势。载畜量稳定增加,2040 年达 606. 4 万羊单位,但因人工草地减少,后期有较大波动。农村经济增长缓慢,经济结构以种植业为主。

3.5 三种治理模式的水土流失发展动态

A 综合治理模式 由于该模式治理强度大,轻度侵蚀面积呈减少—增加的波动变化趋势;中度侵蚀面积呈持续减少的变化趋势,后期稍有增加,最终可比现状减少 80%。强度侵蚀面积近期急骤减少,可减至 50. 96× 10⁴ hm², 以后缓慢递减,最终保持在 21. 43× 10⁴ hm², 约为现状的 21. 22%, 土壤侵蚀以轻中度侵蚀为主。近 40 a 土壤侵蚀总量迅速减少,中后期递减减缓,2080 年减至 6 143× 10⁴ t, 比基期减少 67. 9%。治理保存面积可增加到 207. 53× 10⁴ hm², 治理度保持在 79. 1%(见表 3, 图 3), 生态环境有显著改善。

B 协调发展型 该治理模式, 不同程度土壤侵蚀面积和土壤侵蚀总量均比 A 模式稍小, 到 2040

年, 中度、强度侵蚀面积可分别减少到现状的 35.2% 和 65.4%, 侵蚀量减少 43.7%; 到 2080 年, 中度、强度侵蚀面积可分别比现状减少 58.5% 和 61.4%, 土壤侵蚀以中轻度侵蚀为主, 侵蚀量可比现状减少 52.1%, 生态环境有较显著的改善。

C 传统经营模式 该模式保持传统的耕作、垦荒、超载过牧等粗放经营方式, 故水土流失没有显著变化。但轻度、中度和强度侵蚀的增减变化速率与

A 模式有较大差异, 即轻度侵蚀近 20 a 有较大减少, 以后保持波动稳定状态。中度侵蚀近期缓慢递减, 中期波动增加, 最终可减至 $75.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 约比近期减少一半; 强度侵蚀呈现波动递减趋势, 近期减少较快, 后期减少速度减慢, 最终可减至 $33.99 \times 10^4 / \text{hm}^2$ 以中强度侵蚀为主。土壤侵蚀总量有一定的减少, 后期稍有增加, 2080 年可减至 $11\,035 \times 10^4 \text{ t}$, 比基期减少 42.4%, 生态环境没有明显改善。

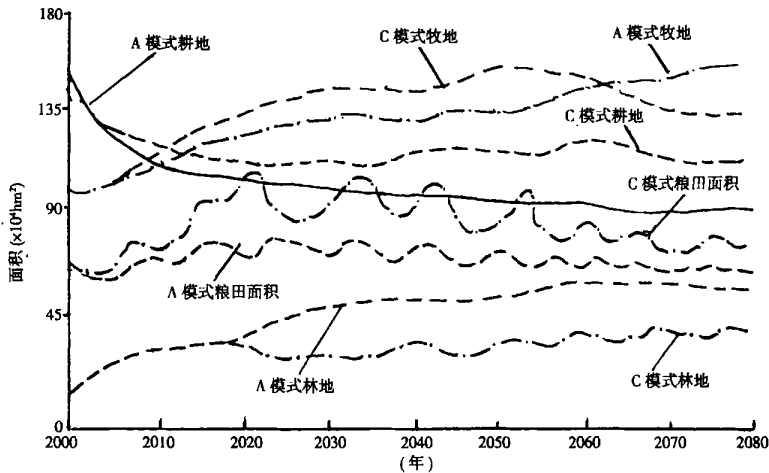


图 1 A 模式与 C 模式的土地利用发展动态

Fig. 1 The development dynamic of land use for Pattern A and Pattern C

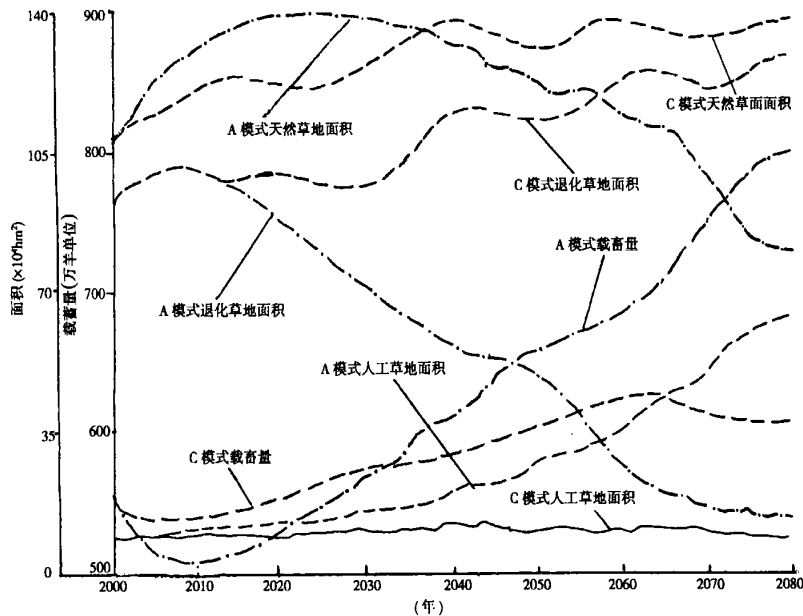


图 2 A 模式与 C 模式的主要产出效益预测比较

Fig. 2 The main output benefit of simulating prediction for pattem A and pattem C

表 3 三种治理模式的不同程度侵蚀面积与侵蚀量发展动态
Table 3 The prediction of erosion area and erosion amount for three harnessing patterns

模式	年份	侵蚀面积 ($\times 10^4\text{hm}^2$)	侵蚀分类面积($\times 10^4\text{hm}^2$)			占总侵蚀面积(%)			治理面积 ($\times 10^4\text{hm}^2$)	总侵蚀量 ($\times 10^4\text{t}$)	减少 (%)
			轻度	中度	强度	轻度	中度	强度			
基期	2000	272.46	24.99	146.50	100.97	5.72	55.82	38.47	52.07	19160	0
A	2020	188.93	20.40	112.57	55.96	10.80	59.60	29.62	104.61	12800	33.19
	2040	152.67	21.21	93.44	38.02	13.89	61.20	24.89	128.85	9901	48.32
	2080	110.11	37.10	51.58	21.43	34.15	46.84	19.83	207.53	6143	67.94
B	2020	196.49	21.83	107.68	66.98	11.16	54.80	34.09	97.16	13650	28.76
	2040	175.52	29.43	95.10	50.98	16.50	53.27	28.56	125.18	10789	43.69
	2080	171.13	71.99	60.08	39.06	42.07	35.11	22.82	203.38	9181	52.08
C	2020	219.69	16.85	119.75	83.09	7.67	54.51	37.82	81.97	16260	15.14
	2040	167.55	14.95	97.47	55.33	8.92	58.17	33.02	97.94	14115	26.33
	2080	122.83	13.71	75.13	33.99	11.15	61.61	27.67	116.61	11035	42.40

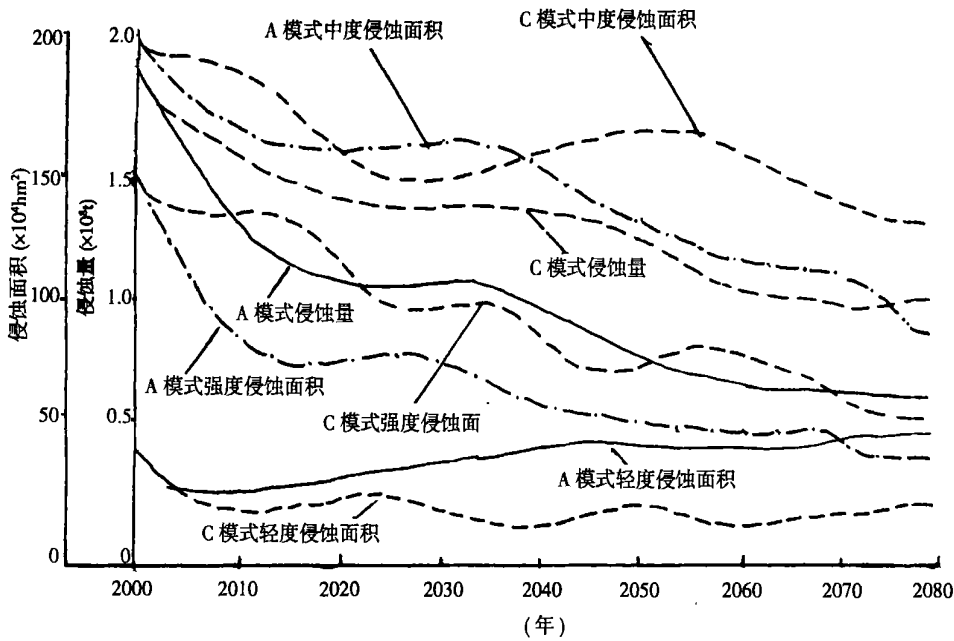


图 3 A 模式与 C 模式的土壤侵蚀发展动态比较
Fig. 3 The Comparison of changing trends of soil erosion for pattern A and Pattern C

4 生态环境恢复重建方案优选

应用多目标模糊综合评审^[4]对三种仿真方案优选. 设生态经济系统的总体功能为 X , 则
 $X = \{ A_1(\text{经济效益}), A_2(\text{社会效益}), A_3(\text{生态效益}), A_4(\text{可行性}) \}$ (5)
 A_i 是评审因子对各类效益的隶属度, A_{ij} 为评审因子(a_{i2}, a_{i3}) 在论域 X 上的模糊子集, 即

$A_{1j} = (a_{11}\text{农村总收入}, a_{12}\text{农业总产值}, a_{13}\text{产业结构})$
 $A_{2j} = (a_{21}\text{粮食产量}, a_{22}\text{载畜量}, a_{23}\text{畜产品量}, a_{24}\text{木材蓄积量}, a_{25}\text{果品产量})$
 $A_{3j} = (a_{31}\text{植被盖度}, a_{32}\text{中度侵蚀面积}, a_{33}\text{强度侵蚀面积}, a_{34}\text{土壤流失总量})$
 $A_{4j} = (a_{41}\text{治理投资}, a_{42}\text{治理投工}, a_{43}\text{产投比}, a_{44}\text{投资回收期}, a_{45}\text{风险程度})$

用模糊评分法对各评价指标 a_{ij} 进行百分制模

糊计量, 即对投资、水土流失指标取最小者为 100 分, 其余指标取最大者为 100 分, 求其相对百分数, 依此类推。

功效系数是评审因子的综合判定, 可由下式计算功效系数

$$R_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}} \quad i=1, 2, \dots, m \tag{6}$$

式中 a_{ij} 为第 i 种效益第 j 个评价指标的模糊评分

值; n 为评审因子数; m 为评价指标数。对各类效益的重要性, 由专家经验法分别赋予权重系数 α_i , 其总和为 1。则总功效系数:

$$D = \sum_{i=1}^n \alpha_i R_i \quad i=1, 2, \dots, n \tag{7}$$

依评审的 D 值大小, 可确定各仿真方案的次序, D 值大者最优(表 4)。

表 4 三式仿真方案的多目标综合评审结果
Table 4 Multipurpose fuzzy comprehensive judgment of simulating result for three patterns

目标年	评审方案	经济效益	社会效益	生态效益	可行性	总体功能	
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	D	优序
2020	A	62.44	86.37	98.95	94.15	88.56	2
	B	82.28	88.99	96.14	99.85	90.65	1
	C	90.61	98.43	81.57	75.35	87.26	3
2040	A	67.71	82.21	99.58	96.15	81.65	2
	B	89.02	85.49	96.25	98.68	84.75	1
	C	94.45	93.35	72.56	73.52	79.86	3
2080	A	94.36	79.48	99.95	94.58	87.65	2
	B	96.91	85.47	81.42	98.69	89.36	1
	C	97.68	79.54	56.23	57.56	75.24	3

对三种治理模式仿真结果的综合评审结果表明: 在三个目标期(2020 年, 2040 年, 2080 年), 统筹兼顾各种效益与可行性, 三种模式的总体功能 D 值优序均为 B 模式最优, A 模式次之, C 模式最差, 差异显著; 生态效益的滞后效应也差异显著, 即后期 C 模式的 R_3 差别大。因此, 农牧协调发展模式是该区生态环境重建与持续发展的最优策略, 而综合治理模式在经济发展和投资许可的情况下, 也不失为一种可供选择的优选发展方案; 传统经营模式在后期对生态环境和农林牧业发展的潜在影响则不容忽视。

5 生态环境治理与重建的途径与对策

1. 合理调整土地利用结构, 大力发展基本农田, 加快陡坡农地退耕 农林牧土地利用发展动态差异大, 耕地对土壤侵蚀影响强烈, 土壤侵蚀处于由轻到中、由中到强的发展过程, 轻、中度侵蚀有明显的滞后增加趋势。故应大力发展水平梯田、条田等基本农田, 改善农业生产条件, 提高粮食单产, 促

进牧业发展。严禁垦荒, 促陡坡退耕造林种草, 以减少土壤侵蚀。

2. 建立以灌木为主的防护林, 发展适地适树优良树种 川平滩地应建农田防护林, 沟壑建杨、柳、榆防冲林; 沟坡、原边和荒漠建柠条、紫穗槐、草木栖等为主的灌草混交带, 防风固土, 减少土壤侵蚀。并大力发展苹果、桃等果树和经济林木, 提高林业经济效益。逐步增加森林植被覆盖度, 防止土地退化, 改善农田生态环境和生产条件, 促进农牧业发展。

3. 种草养畜, 以草定畜 大力发展苜蓿、沙打旺等人工草, 实行草田轮作、草灌混交和改良草场, 提高草地生产力。合理控制载畜量和调整畜群结构, 以草定畜, 以牧促农, 可防止草场退化和畜牧业发展大起大落的不稳定状况, 使牧业持续稳定发展。

4. 合理调整作物结构, 大力发展旱作农业和生态农业 坡地水蚀严重, 陡坡退耕要与加速高产农田建设同步, 稳定粮食生产, 扩大经济作物面积, 建设水浇地、梯条田, 立体农业综合互补的高产农田

体系。大力发展旱作农业和生态农业,改变传统经营方式,推广现代科技旱作农业耕作技术,提高土地生产力,促进生态——经济良性循环。

5. 生态环境重建应近期、中期、远期效益统筹兼顾 在不同阶段应合理调整治理策略,农牧协调发展治理模式是该区生态经济持续发展的最佳策略,应坚持不懈的治理,循序渐进,可逐步改善生态系统运行机制与功能,促进生态环境改善和区域经济持续增长。

参考文献 (References):

[1] Wang Qifan. Systematic Dynamics [M]. Beijing: Qinghua Univer-

sity Press, 1988, 220~223. [王其蕃, 系统动力学[M], 北京: 清华大学出版社, 1988, 220~223]

[2] He Wenjiao. Feedback Control Theory [M]. Shanghai: Bright Daily Paper Press, 1986, 188~192. [何文蛟, 反馈控制理论[M], 上海: 光明日报出版社, 1986, 188~192]

[3] Department of Soil Resource of Gansu Province. Gansu Province Land Resource [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 2002, 154~165. [甘肃省国土局, 甘肃省土地资源[M], 兰州: 甘肃科技出版社, 2002, 154~165]

[4] Zhang Hanxiong, Shao Mingan. The Ecological Environmental Construction of Loess Plateau [M]. Xi'an: The Shaanxi Science and Technology Press, 2001, 156~164. [张汉雄, 邵明安. 黄土高原生态环境建设[M], 西安: 陕西科技出版社, 2001, 156~164]

Simulation of Resuming and Rebuilding Weak Eco-environment and Developing Agriculture and Husbandry in Longzhong Semi-Arid Region

ZHANG Han-xiong^{1, 2} SHANG Guan Zhopin¹

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi;

2 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: Based on the system dynamic theory, a SD model of resuming and rebuilding of the weak ecological environment in the Longzhong interlock zone of agriculture and animal husbandry has been built. With this model, the ecological developping trends of the zone in nearly 80 years from 2000 to 2080 has been simulated under three typical management patterns: (1) the type of comprehensive management; (2) the type of steady development in agriculture and animal husbandry, and (3) the type of traditional management. As the results shows, the type of steady development can best balance the development of agriculture and animal husbandry, and reduce of soil erosion by 67.9 percent, and promote the ecological environment in this region into to a benefit circle. So, that is the best pattern for improving the ecological environment in this region.

Key words: Longzhong semi-arid region; ecological environment; resuming and rebuilding; SD model; development pattern; simulating study