



移动阅读

杨永均,张绍良,侯湖平,等. 基于非线性动力学模型的矿山土地生态系统恢复力机制[J]. 煤炭学报,2019,44(10):3174-3184. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1272

YANG Yongjun,ZHANG Shaoliang,HOU Huping, et al. Resilience mechanism of land ecosystem in mining area based on nonlinear dynamic model[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(10):3174-3184. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1272

基于非线性动力学模型的矿山土地生态系统恢复力机制

杨永均^{1,2},张绍良^{1,2},侯湖平^{1,2},陈 孚^{1,2}

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院,江苏 徐州 221116; 2. 矿山生态修复教育部工程研究中心,江苏 徐州 221116)

摘要:实现近零生态损害的资源开采、国土空间生态的系统修复,恢复力是关键。尽管一些研究直接或者间接地指出了恢复力的重要性,但目前对矿山土地生态系统恢复力机制的理论认识还很缺乏。构建了一个矿山土地生态系统的非线性动力学模型,利用数值模拟方法来揭示恢复力在矿山土地生态系统中的动力学表现和基本性质,以期为矿山区域国土空间的系统修复和保护提供理论依据。研究表明:①恢复力是矿山土地生态系统的基本属性,是指在有限强度的扰动后,系统具有回复到平衡点、保持原状态和定性结构的能力;②恢复力产生的原因是系统具有复杂结构,且是自组织的,在面临扰动时表现出自维持能力;③参数变量是决定恢复力大小的重要因素,其阈值空间是测度恢复力的直接指标;④恢复力具有可塑性,调控恢复力的基本途径是恢复力强化和克服,关键技术是对参数变量及其阈值、状态-参数变量间关系进行调控。矿山土地生态系统恢复力是一个客观存在的动力学属性,该属性为采矿前土地生态影响评估、采矿中土地生态系统状态维持、采矿后土地生态系统修复和可持续发展提供了基本依据。恢复力可以作为系统保护和修复的核心准则,恢复力思维则是指导土地复垦与生态修复的核心理论之一。未来需要加强对恢复力测度、调控和建设方法的研究,并在与采矿活动和环境保护的具体工程中大力推进恢复力机制的技术应用和集成。

关键词:生态修复;恢复力;动力学;自然恢复;土地生态系统;矿山

中图分类号:TD88

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)10-3174-11

Resilience mechanism of land ecosystem in mining area based on nonlinear dynamic model

YANG Yongjun^{1,2},ZHANG Shaoliang^{1,2},HOU Huping^{1,2},CHEN Fu^{1,2}

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Engineering Research Center for Mine Ecological Restoration of Ministry of Education, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Resilience is the key to achieve the goal of the resources exploitation with near-zero ecological damage and the systematic restoration of the land ecosystem. Although few studies have directly or indirectly suggested the importance of resilience, the current theoretical understanding on the resilience mechanism of land ecosystem is still limited. This paper has established a nonlinear dynamic model of land ecosystem in mining area and used the numerical simulation to reveal the resilience's dynamic performance and fundamental properties. This research aims at providing the-

收稿日期:2018-09-22 修回日期:2018-12-20 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41807515,51874307);中国博士后科学基金资助项目(2018M632426)

作者简介:杨永均(1990—),男,四川仪陇人,讲师,博士。Tel:0516-83591320,E-mail:yangyongjuncumt@163.com

通讯作者:张绍良(1968—),男,安徽太湖人,教授,博士。Tel:0516-83591301,E-mail:slzhang@cumt.edu.cn

oretical reference for the systematic protection and restoration of the land ecosystem in mining area. The results show that ① Resilience is the basic property of the land ecosystem. After the disturbance with limited intensity, the system has the ability to return to the equilibrium point, maintain the original state and the qualitative structure; ② The cause for the emergence of resilience is that the system has a complex and self-organized structure therefore show a self-sustaining ability in the face of disturbance; ③ The parameter variables are important factors for determining the magnitude of resilience, and their threshold space are direct indicators of the resilience; ④ Resilience has deformability, the basic pathways for regulating resilience are resilience enhancement and overcoming, the key technique is to regulate the relationship among parameter variables and their thresholds and state-parameters variables relationship. The resilience of land ecosystem is a dynamic property, which can provide a basis for the ecological impact assessment before mining, the maintenance of land system during mining, the restoration and sustainable development after mining. Resilience can be adopted as the core criteria for land ecosystem protection and restoration. Resilience thinking is one of the core theories guiding land reclamation and ecological restoration. In the future, the research on the methods of resilience measurement, regulation and building needs to be strengthened. The application and integration of resilience mechanism in specific engineering about mining and environmental protection should be further promoted.

Key words: ecological restoration; resilience; dynamics; natural recovery; land ecosystem; mining area

生态环境的系统保护和修复一直是伴随矿产资源开发的迫切任务^[1-2]。近来,煤炭行业提出了到 2035 年实现近零生态损害开采的目标^[3]。新形势下,矿山土地复垦和生态修复面临更高的要求和挑战。目前,一些研究指出采矿对脆弱区生态环境有很大的影响,如内蒙古草地退化 64.6% 归因于采煤业^[4]、榆神府矿区 758.9 km² 的地下水水位下降幅度超过 8 m^[5]。这些生态效应引起广泛的隐忧,当采矿扰动超过环境容量,可能引起大规模生态退化。但是,也有研究发现,植被群落在采矿沉陷后没有发生显著变化,生态系统表现出一定的抵抗能力^[6]。另一方面,一些研究报道了采矿扰动后生态系统的自然恢复能力,如沉陷盆底区土壤含水量在采后 1 a 就恢复到采前的水平^[7],复垦林地的林木蓄积量、土壤各环境指标都呈现 S 型曲线增长^[8]。采矿后大规模生态建设并不一定是必须的,如,可以依据采煤沉陷的完全均匀、相对均匀和非均匀区,划分自修复和非自修复区^[9]。因此,依靠自然的力量来完成修复过程成为矿区土地复垦与生态修复领域新的思潮^[10-11]。此外,在多变的环境下,已修复系统的长期可持续性也成为关注的焦点。发达国家普遍要求重建或者修复的生态系统是自维持的,必须能够抵抗野火和干旱等干扰^[12-13]。国内学者也逐渐意识到构建一个自维持系统的重要性,因为这有利于减低修复成本、规避修复失败的风险、提高修复的长期效益^[14-15]。

这些客观事实和科学发现都触及到一个核心问题,这个问题就是矿山土地生态系统在面临采矿和其他扰动时拥有何种程度的维持自身状态的能力,也就是恢复力(Resilience)问题。显然,恢复力问题十分

关键,它关系到采矿是否会导致大规模生态退化、能否实现近零生态损害的开采、自然恢复与人工修复如何决策、修复后土地生态系统能否长期自我维持。因此,十分有必要认识恢复力,为矿山土地复垦与生态修复提供理论依据^[15-16]。

在生态学领域,恢复力概念在 40 多年前就被提出来,指系统吸收扰动并重组组织来从根本上保持相同的特性(包括功能、结构和反馈)的能力^[17]。但恢复力近 10 a 才引起广泛关注,被认为是可持续的核心,逐渐在防灾减灾、城市规划、森林保护等领域得到应用^[18-20]。尽管过去在矿山生态影响评价和土地复垦技术等方面开展了大量的实证研究,但对恢复力的理论研究还很少。在矿山领域,恢复力管理和恢复力思维才刚刚被引入到与矿山相关的生态保护中,主要讨论了恢复力思维在引导采矿迹地可持续发展中的作用^[21-22]、脆弱矿区恢复力管理^[23]、恢复力多尺度测度的研究框架^[24]。现代保水采煤相关研究也逐渐体现出对恢复力的重视^[25],如研究提出生态脆弱矿区采后有效隔水层为 42.6 m 的离石黄土或 21.0 m 的保德红土可以使得潜水保存^[26]; 2.15 m 为地下水对生态脆弱区沙柳蒸腾有效贡献的阈值^[27]。尽管这些研究都直接或者间接地指出了恢复力的重要性,但由于恢复力概念的抽象性和复杂性,现有研究还没有直观地揭示矿山土地生态系统恢复力机制,特别是对恢复力的表现形式和形成过程等缺乏研究和系统的了解。

鉴于此,笔者建立非线性动力学模型,利用数值模拟方法来揭示恢复力在矿山土地生态系统中的动力学表现和基本性质,以期为矿山区域国土空间的系

统修复和保护提供理论依据。

1 非线性动力学模型

1.1 系统架构

土地生态系统是地表各自然地理要素之间以及与人类之间相互作用所构成的统一整体^[28],一直是矿山扰动和修复的直接对象和着力点。考虑一个立体有界的土地生态系统单元,土壤-植被-水文-大气是核心的系统要素,4者通过相互关系耦合在一起,如图1所示。其中,生物量、含水量和有机质对生态系统服务功能起决定作用,因此是表征土地生态系统状态的变量,变量的不同取值组合下有水域、沙漠、森林等显著不同的状态。

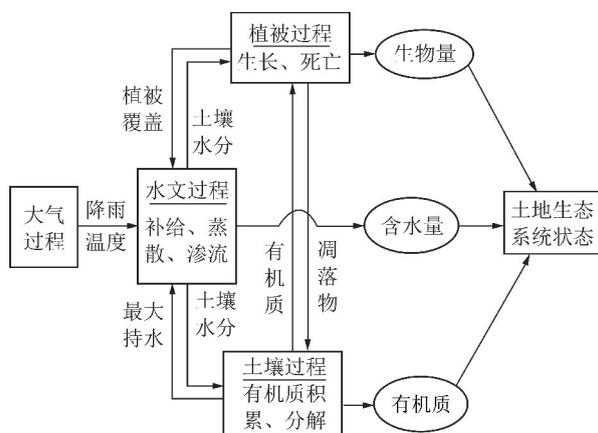


图1 简化的土地生态系统的动力学架构

Fig. 1 Dynamic framework for the simplified land ecosystem

土地生态系统是开放的,受到诸多外界因素的干扰。采矿扰动,如挖损、沉陷、裂缝、压占、地下水疏排等;生态修复,如土壤重构、植被补栽等,直接或者间接地扰动土地生态系统的要素和过程,甚至使土地生态系统的状态发生改变。笔者考虑简化的土地生态系统及采矿扰动,对其进行数学建模,作为定性理论研究。

1.2 数学模型

1.2.1 基本方程

曾晓东等曾建立草原生态动力学模式,该模式的建模方法和结果已经在我国内蒙古区域生态模拟中得到了实际检验^[29]。参照草原生态动力学模式建模方法和模型架构,考虑的土地生态系统由植被、水文、土壤组成,且受到气候、人为活动的影响;只有一个植被种群,且对地表是部分覆盖的;土壤有机质、含水量的空间分布是均质的;有空间(上、下、左、右)边界。建立一个生物量 V 、含水量 W 和有机质 S 三变量的非线性动力学模型(VWS-model):

$$dV/dt = G(V, W, S) - M(V, W, S) - C(V) \quad (1)$$

$$dW/dt = P - E(V, W, S) - R(V, W, S) \quad (2)$$

$$dS/dt = T(V, W, S) - A(V, W, S) - D(V, W, S) \quad (3)$$

其中, G, M, C 分别为植被生物量的年生长量、凋亡量、消耗量; P, E, R 分别为降雨量、蒸发量、径流量; T, A, D 分别为植被死亡残体中含有的有机质总量、植被残体在地表的堆积量、土壤有机质的矿化分解量。

模型中, P 为给定的。其余各量则可以根据生态学定律和数学分析确定。如, G 由年最大生物量增长率 α_V 决定,但 α_V 受含水量 W 和有机质 S 的制约,它们的数学关系表达为式(4)。其他各量之间的数量关系可参照这一方法给出,如式(5)~(14)所示,具体推导过程参见文献[30]。

$$G = \alpha_V (1 - e^{-\varepsilon_C V/V^*}) (1 - e^{-\varepsilon_W W/W^*}) (1 - e^{-\varepsilon_S S/S^*}) \quad (4)$$

$$M = \alpha_V \beta_V (e^{\varepsilon_M V/V^*} - 1) [(1 - e^{-\varepsilon_W W/W^*})^{-1} + (e^{\varepsilon_W W/W^*} - 1)] (1 - e^{-\varepsilon_S S/S^*})^{-1} \quad (5)$$

$$C(V) = \alpha_V \gamma_V (1 - e^{-\varepsilon_C V/V^*}) \quad (6)$$

$$E = E_S + E_V \quad (7)$$

$$E_S = e^* \{ (1 - \sigma) + \sigma [1 - k_{E_S} (1 - e^{-\varepsilon_{E_S} V/V^*})] \} \times (1 - e^{-\varepsilon_{E_S} W/W^*}) e^{-\varepsilon_{E_S} S/S^*} \quad (8)$$

$$\sigma = 1 - e^{-\varepsilon_{\sigma} V/V^*} \quad (9)$$

$$E_V = e^* \varphi_{SV} \sigma (1 - k_{E_V} e^{-\varepsilon_{E_V} V/V^*}) (1 - e^{-\varepsilon_{E_V} W/W^*}) \times (1 - e^{-\varepsilon_{E_V} S/S^*}) \quad (10)$$

$$R = \lambda_R P \{ (1 - \sigma) + \sigma [1 - k_R (1 - e^{-\varepsilon_R V/V^*})] \} \times (e^{\varepsilon_R W/W^*} - 1) (e^{-\varepsilon_R S/S^*}) \quad (11)$$

$$T = 0.5M \quad (12)$$

$$A = 0.5\alpha_S \alpha_V (e^{\varepsilon_A V/V^*} - 1) (e^{\varepsilon_A S/S^*} - 1) \quad (13)$$

$$D = \beta_S (1 - e^{-\varepsilon_D V/V^*}) (1 - e^{-\varepsilon_D S/S^*}) (1 - e^{-\varepsilon_D S/S^*}) \quad (14)$$

VWS-model中, V, W 和 S 为人们直接关心的土地生态系统表现的变量,称为状态变量; V^*, W^* 和 S^* 是它们的特征量,其作用是将模型简化为无量纲的标准化形式,其值等于土地生态系统所在区域的均值。其余的各量是模型的参数,这些参数影响状态变量的最终取值,称为参数变量。

1.2.2 扰动项引入

不论是哪种采矿扰动和生态修复措施,最终都以改变土地生态系统的状态变量(X)和参数变量(p)体现出来。考虑将改变后的状态或参数(X_b, p_b)表达为改变前(X_a, p_a)与扰动系数(θ_X, θ_p)的线性函数:

$$X_b = \theta_X X_a \quad (15)$$

$$p_b = \theta_p p_a \quad (16)$$

除采矿扰动和生态修复措施外,矿山土地生态系

统受到很多随机因素的扰动。在 VWS-model 的基础上增加随机扰动项,引入一个均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声 $\xi(t)$ 作为随机因素,并考虑这些随机因素对状态变量(生物量、含水量和有机质)的扰动强度系数为 η_v, η_w 和 η_s ,即

$$dV/dt = G - M - C + \eta_v \xi(t) \quad (17)$$

$$dW/dt = P - E - R + \eta_w \xi(t) \quad (18)$$

$$dS/dt = T - A - D + \eta_s \xi(t) \quad (19)$$

1.2.3 稳定性判定

按照线性近似稳定性方法及李雅普诺夫第二方法判定 VWS-model 的动力学稳定性^[31],求 V, W, S 的零倾线:

$$dV/dt = 0, dW/dt = 0, dS/dt = 0 \quad (20)$$

零倾线在 $V>0, W>0, S>0$ 范围内的交点即为平衡点,判断平衡点稳定性情况,据雅可比矩阵:

$$J = \begin{bmatrix} \partial f/\partial V & \partial f/\partial W & \partial f/\partial S \\ \partial g/\partial V & \partial g/\partial W & \partial g/\partial S \\ \partial k/\partial V & \partial k/\partial W & \partial k/\partial S \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中 f, g, k 分别代表关于 V, W, S 的函数。

若雅可比矩阵的特征值 λ 的实部为负,则平衡点是稳定的;否则,平衡点是不稳定的。

1.2.4 恢复力刻画

当状态变量受到扰动时,即 VWS-model 系统的初值(V_0, W_0, S_0)改变时,平衡解(V, W, S)满足:当 $t \rightarrow \infty$ 时,从附近区域(D)任意初值的轨线趋向于平衡解。 D 称为系统平衡解的吸引域(Basin of Attraction)。

在吸引域内,任意扰动状态变量, VWS-model 系统的最终平衡解不变,系统表现出抵抗扰动、保持自身状态的能力,即恢复力。吸引域的形态决定了系统恢复力的大小。从刻画吸引域的形态入手,利用稳定平衡点(V, W, S)到最近的一个不稳定平衡点(V_u, W_u, S_u)的欧氏距离(记为 R_D)反应恢复力的大小:

$$R_D = \sqrt{(V - V_u)^2 + (W - W_u)^2 + (S - S_u)^2} \quad (22)$$

此外,当雅可比矩阵特征值的实部为正时,平衡点不稳定。这一性质可以用来表示一个系统在受扰后回复到平衡点的时间^[32]。取平衡点的较大特征值的实部的相反数的倒数(记为 R_T)反映恢复力的大小:

$$R_T = 1/(-\lambda) \quad (23)$$

当参数变量受到扰动时,参数变量在一定范围内变化,系统拓扑结构不发生突变(分岔),此时,系统表现出抵抗扰动、保持自身结构的能力,即恢复力。

取参数变量值(p)到分岔值(p_0)之间的相对距离(R_S)反映恢复力的大小:

$$R_S = \frac{|p - p_0|}{p} \quad (24)$$

2 实验区、模型参数及验证

2.1 区域概况

为直观地解析恢复力机制,笔者采用数值模拟的方法对上述模型的动力学特性进行分析。数值模拟的基础数据来源于实验区。实验区位于内蒙古西南部的补连沟,地处毛乌素沙漠与陕北黄土高原交错过渡带。该区为典型的生态脆弱区,降雨少、蒸发大,植被结构简单、生产力低,是典型的荒漠生态系统。地表植被主要依赖于大气降雨补给的表层土壤水^[33]。为地下采煤矿山,开采侏罗系煤层。该区主要的生态扰动为采矿伴生的沉陷、裂缝、地下水疏排,以及生态修复,如植被补栽、裂缝充填。

2.2 模型参数

数值模拟设置原状、采矿扰动、修复扰动、随机扰动 4 种情景。其中,参数变量为区域自然本底的平均值。为消除自然波动因素,年降雨量取近 15 a 的平均值,其他参数变量取值根据实地测量结果和文献析取^[23,34-35]的方法来获得,见表 1。除表 1 外,还有参数包括 $\varepsilon_G, \varepsilon'_G, \varepsilon''_G, \varepsilon_M, \varepsilon'_M, \varepsilon''_M, \varepsilon_C, \varepsilon_\sigma, \varepsilon_{E_S}, \varepsilon'_{E_S}, \varepsilon''_{E_S}, k_{E_V}, \varepsilon_{E_V}, \varepsilon'_{E_V}, \varepsilon''_{E_V}, \varepsilon_R, \varepsilon'_R, \varepsilon''_R, \varepsilon_A, \varepsilon'_A, \varepsilon''_A, \varepsilon_D, \varepsilon'_D, \varepsilon''_D$, 这些参数为无量纲参数,取值为 1。

表 1 参数变量的含义和取值

Table 1 Meaning and value of parameter variables

符号	含义	取值
V^*	土地生态系统生物量 V 的特征量 (区域平均值)/kg	0.30
W^*	土地生态系统含水量 W 的特征量 (区域平均值)/mm	224
S^*	土地生态系统有机质 S 的特征量 (区域平均值)/kg	1.49
α_v	年最大生物量增长量/($\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$)	0.35
β_v	生物量的自然凋亡率/无量纲	0.01
γ_v	生物量的损耗率/无量纲	0.10
P	年降雨量/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	345
e^*	最大蒸发潜力/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	1 000
k_{E_S}	植被遮盖使蒸发降低的系数/无量纲	0.40
φ_{S_V}	植被蒸腾占蒸发潜力的比例/无量纲	0.60
λ_R	降雨量的最大径流系数/无量纲	0.015
K_R	植被遮盖使径流降低的系数/无量纲	0.40
α_S	年最大生物量增长量凋亡残体堆积在地表的系数/无量纲	0.012
β_S	年最大有机质分解潜力/($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	0.02

对于采矿扰动、修复扰动2种情景,这2种情景是考虑在采矿和修复活动结束后,状态变量和参数变量在原状水平上发生一定程度的改变。受扰动的参数及扰动系数依据现场调查估计的平均水平,主要包括状态变量 V, W, S 初值及部分参数变量。其中 W 的取值是指植被所依赖土地表层土壤含水的扰动系数,取值情况见表2。

表2 采矿和修复对状态和参数变量的扰动系数

Table 2 Disturbance coefficients of mining and restoration on the state variables and parameters

情景	扰动项	
	状态变量	参数变量
采矿扰动	V, W, S 初值为原状的85%, 85%, 85%	$\alpha_V, \beta_V, \lambda_R, \alpha_S, \beta_S$ 为原状的85%, 115%, 2000%, 115%, 115%
修复扰动	V, W, S 初值为原状的120%, 120%, 100%	$\alpha_V, \beta_V, \lambda_R, \alpha_S, \beta_S$ 为原状的120%, 100%, 100%, 100%, 100%

对于随机扰动情景,如式(17)~(19)所示,随机扰动只长期扰动状态变量,扰动因素为高斯白噪声 $\xi(t)$,扰动强度系数 η_V, η_W 和 η_S 参照当地长期自然波动的强度,取值为 $\pm 10\%$ 。

2.3 模型验证

半干旱过渡带生态学指标与降雨有很强的相关关系^[23],利用这一特征来验证模型的有效性。一方面,以实验区为中心,垂直于过渡带30 a平均降雨量等值线设置样带,在样带上沿降雨量梯度(0~500 mm)获取实际生物量的多点抽样平均值^[36]。另一方面,在模型中对降雨量进行连续取值,并求解达到平衡态时土地生态系统生物量数据。利用模拟数据和真实数据的相关性来反映模型的合理性,结果如图2所示。可以看出模拟值和实际值之间有显著相关关系($R^2=0.87$),这表明模拟结果符合实际情况,模型能够很好地反映过渡带生物量随降雨量变化的关系,适用于对研究区进行数值模拟。

3 矿山土地生态系统恢复力机制

3.1 恢复力的动力表现

3.1.1 平衡解的吸引力

在不同情景下,将参数变量的取值分别代入,并以状态变量特征值作为状态变量初值,进行数值模拟。对动力系统求平衡解及其历时,并判定稳定性,结果见表3。

可以看出,在原状、采矿扰动和修复扰动3种情景下,动力系统都有两个平衡解,其类型分别是渐进

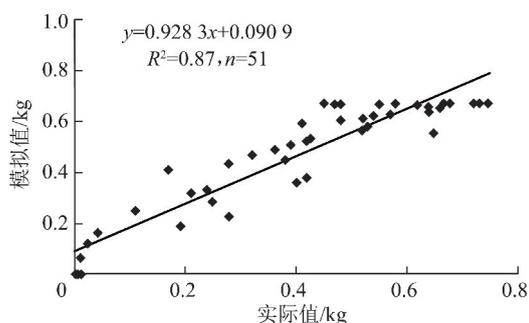


图2 生物量模拟值与实际值的相关关系

Fig. 2 Relationship between simulated and actual values

稳定点、不稳定鞍结点。从渐进稳定的历时来看,采矿扰动最长(288 a)、修复扰动最短(88 a),这是因为采矿扰动和生态修复两种活动改变了系统的状态变量和参数变量,分别使系统更慢、更快地达到平衡状态。随机扰动情景下,平衡解是区间值,这是因为随机扰动因素长期存在,状态变量始终在某个范围内波动。因此,随机扰动下,土地生态系统没有稳定的平衡状态。

表3 动力系统的平衡解及其稳定性

Table 3 Equilibriums and their stability of the dynamic system

情景	平衡解(V, W, S)	历时/a	类型
原状	(0.65, 239.26, 2.12)	99	渐进稳定
	(0.40, 661.24, 4.09)	—	不稳定鞍结点
采矿扰动	(0.58, 213.72, 1.99)	288	渐进稳定
	(0.24, 747.66, 4.51)	—	不稳定鞍结点
修复扰动	(0.66, 239.36, 2.15)	88	渐进稳定
	(0.41, 657.21, 4.10)	—	不稳定鞍结点
随机扰动	(0.40 \pm 0.01, 661.24 \pm 7, 4.09 \pm 0.02)	—	不稳定
	(0.65 \pm 0.01, 239.26 \pm 7, 2.12 \pm 0.02)	—	不稳定

另外,对 V, W, S 的初值进行任意设定,模拟得到不同情景下动力系统轨线簇的拓扑结构。图3给出了原状、采矿扰动、修复扰动、随机扰动4种情景的二维相图,相图以含水量 W 和生物量 V 分别为横纵坐标。可以看出,不同情景下,围绕渐进稳定的平衡解形成了一个吸引域。这个吸引域内,所有轨线都趋向渐进稳定的平衡点。这表明,在吸引域内,动力系统都达到平衡状态与状态变量的初值无关,也即是说,对状态变量 V, W, S 的有限扰动不改变最终的平衡状态。不同情景下吸引域的形态略有区别,这是因为不同情景下参数变量发生改变,使得平衡解位置和吸引域形态发生了改变。

3.1.2 平衡解的阈值效应

由图3可知,不同情景下,参数变量的改变会使得系统吸引域形态发生变化。因此,依次改变各参数

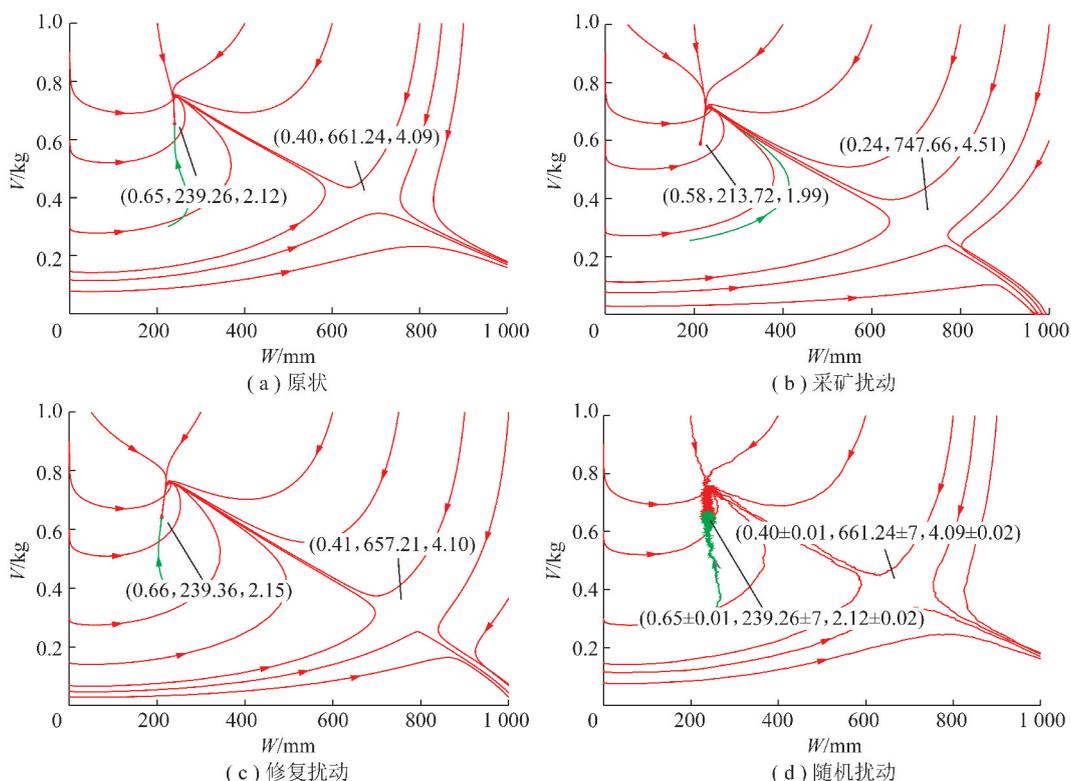


图 3 不同情景下动力系统轨线簇的拓扑结构

Fig. 3 Topological structures of the trajectories in different scenarios

变量,同时求解某参数在不同取值下状态变量的平衡解。随机扰动下无稳定平衡解,因此不考虑其分岔效应。模拟结果表明,在原状、采矿扰动、修复扰动 3 种情景下,VWS-model 中降雨量 P 、年最大生物量增长量 α_V 、年最大有机质分解潜力 β_S 三个参数变量具有分岔作用。

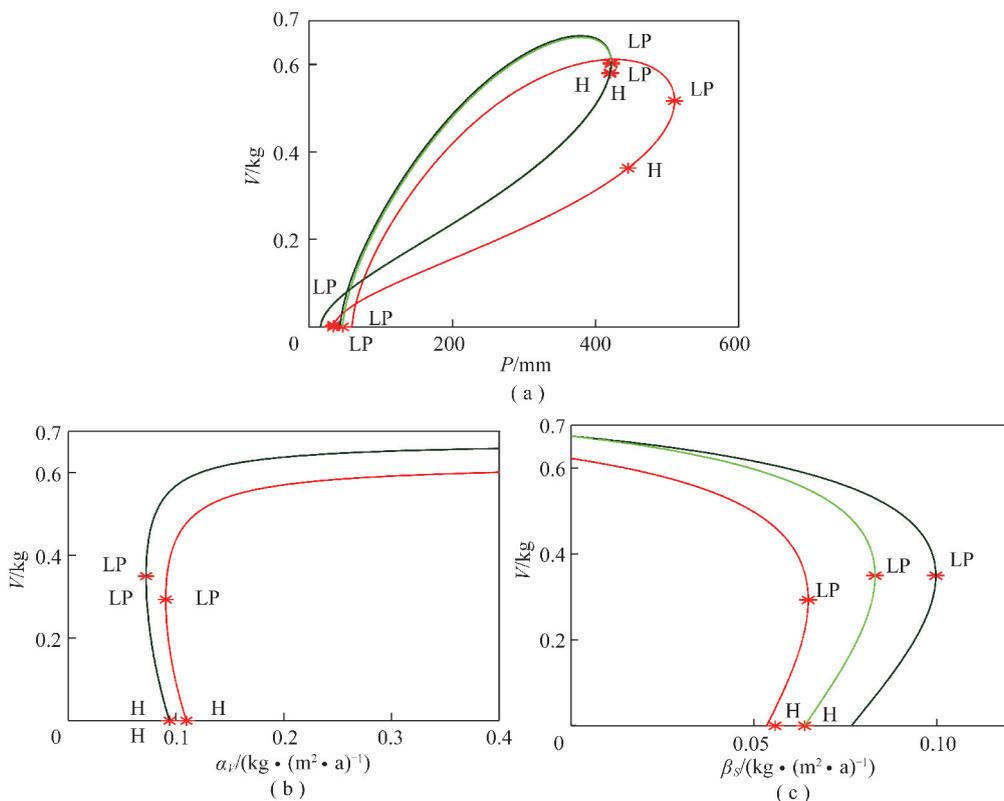
图 4 分别是在 P, α_V, β_S 三个参数变量变化下,生物量 V 的平衡点曲线。浅绿、红色、深绿分别表示原状、采矿扰动、修复扰动 3 种情景。参数变量的任意取值与平衡点曲线的交点即为动力系统的平衡解。

可以看出,当参数变量取值超过一定限度,如当降雨量 P 小于图 4(a) 中的 LP (临界 fold 分岔点) 点,系统状态变量不再有平衡解,这就意味着动力系统的定性结构发生突变,原有的吸引域消失。

表 4 统计了阈值不同参数变量在不同情景下对状态变量 V 的分岔值。其中,降雨量 P 有两个分岔值,当降雨量过小或者过大时,土地生态系统会因干旱、洪涝而突变为沙漠、水域状态。年最大生物量增长量 α_V 、年最大有机质分解潜力 β_S 分别有一个分岔值。

表 4 不同参数变量在不同情景下对状态变量 V 的分岔值Table 4 Bifurcations of parameter variables to V in different scenarios

情景	参数	分岔值	分岔效应
原状	P	15.93	在该双分岔值区间外,不存在吸引域, V 为 0, S 有较小值, W 无界
		421.75	
	α_V	0.07	小于该分岔值时,不存在吸引域, V 为 0, W 和 S 有较小解
	β_S	0.08	大于该分岔值时,不存在吸引域, V 为 0, W 和 S 有较小解
采矿扰动	P	33.64	在该双分岔值区间外,不存在吸引域, V 为 0, S 有较小值, W 无界
		510.10	
	α_V	0.09	小于该分岔值时,不存在吸引域, V 为 0, W 和 S 有较小解
	β_S	0.06	大于该分岔值时,不存在吸引域, V 为 0, W 和 S 有较小解
修复扰动	P	15.47	在该双分岔值区间外,不存在吸引域, V 为 0, S 有较小值, W 无界
		421.70	
	α_V	0.07	小于该分岔值时,不存在吸引域, V 为 0, W 和 S 有较小解
	β_S	0.10	大于该分岔值时,不存在吸引域, V 为 0, W 和 S 有较小解

图4 不同参数变量在不同情景下对状态变量 V 的分岔Fig. 4 Bifurcations of parameter variables to V in different scenarios

参数变量对状态变量的分岔作用就是土地生态系统的阈值效应。由于土地生态系统具有复杂的内部结构,是自组织的,对状态变量和参数变量的较小扰动,并不改变系统的平衡解和定性结构。但当扰动大于一定程度,使得状态变量和参数变量超过阈值,土地生态系统的平衡解发生变化,甚至平衡解不存在,进入混沌状态。因此,恢复力是一种动力学属性,可以被理解为系统的一种内在能力,这种能力表现为:土地生态系统在面临扰动时,通过自组织使得系统的平衡解和定性结构不发生改变,从而保持系统的状态、结构和功能。

3.2 恢复力的基本性质

3.2.1 恢复力的大小

显然,在不同情景下,系统抵抗扰动的能力也可能不同。根据式(22)~(24)测度恢复力的大小,结果见表5。同一情景下,不同恢复力指标取值是无量纲数,不具有可比性。不同情景之间,各个恢复力指标确定的恢复力大小顺序并不一致。这表明,当恢复力使用者关注不同参数时,系统恢复力大小是不一样的。

从 R_D 和 R_T 角度考察恢复力,采矿扰动后恢复力最大,实际原因是采矿后地面裂缝增加了降雨径流通道,系统参数变量 λ_R 增大,使得土地生态系统能

够抵抗更大强度的暴雨,而不至于积水。从参数变量 α_V, β_S 确定的 R_S 指标来看,采矿扰动使得恢复力变小,修复扰动使得恢复力变大,这主要是采矿导致的裂缝和沉陷使得植被年生物量增长率减低、凋亡率提高,恢复力被减弱。裂缝充填、植被补栽等修复活动产生了相反的作用。

表5 不同情景和指标下恢复力的大小

Table 5 Magnitude of the resilience indicators in different scenarios

情景	R_D	R_T	R_S			
			p(1)	p(2)	α_V	β_S
原状	421.98	20.98	20.66	4.82	3.29	0.75
采矿扰动	533.95	36.92	9.26	4.91	1.83	0.62
修复扰动	417.85	16.83	21.30	4.96	4.14	0.80

3.2.2 恢复力的可变性

不同情景下,由于参数变量的取值不同,恢复力大小不同。因此,改变参数变量,则可能对恢复力产生塑造作用。以土地生态系统原状的参数取值为基础,对状态变量 V 进行双参数分岔模拟,结果如图5所示。

图5(a)是 V 对参数 α_V 的平衡点曲线,可以看出,在 P 为 380 mm 和 345 mm 两个水平下, α_V 分岔

值分别为 $0.349, 0.366 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 这表明, 当降雨量大一些, α_V 分岔值则小一些, 此时 α_V 可以承受更多的扰动。

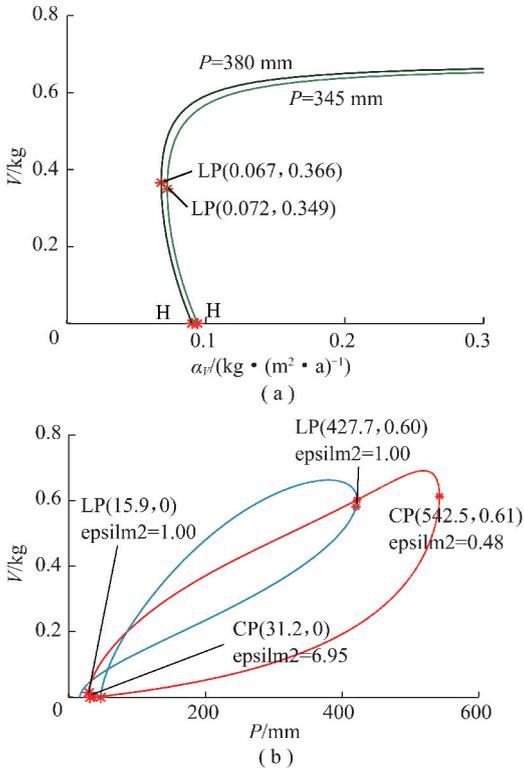


图 5 参数变化对系统参数变量分岔值的影响

Fig. 5 Effects of parameter variables change on bifurcations

图 5(b) 中的淡蓝色曲线是 V 对参数 P 的平衡点曲线, 对右侧 LP 点做双参数分岔模拟, 得到 V 对双参数 (P 和 ϵ_m'') 的分岔点曲线 (红色), 曲线 CP 点为尖点分岔点。分岔点曲线上任意一点都是参数 P 的分岔值。可以看出, 随着参数 ϵ_m'' 取值的不同, 参数 P 的分岔值在发生变化。当 ϵ_m'' 等于 1, 0.48 时, P 的较大分岔值分别为 427.7, 542.5 mm; 当 ϵ_m'' 等于 1, 6.95 时, P 的较小分岔值为 15.9, 31.2 mm。 ϵ_m'' 的含义是含水量增大对年生物量凋亡量的饱和系数, 这个参数决定植被的抗涝性质。因此, 当抗涝性质增强, P 的分岔值区间增大, 植被经受洪涝的阈值范围增大, 应对能力增强, 恢复力增强。恢复力的这种性质表明, 参数是决定恢复力大小的重要因素, 恢复力具有可变性。

4 讨论

4.1 恢复力的测度方法

由于恢复力决定着土地生态系统应对扰动的能力, 且恢复力可能会发生变化, 采矿扰动和生态修复工程可能会侵蚀和增强系统的恢复力, 从而导致系统长期的自维持能力减弱, 这种过程较为隐蔽, 但影响

具有周期长、危害大的特点。如, 我国西部煤炭资源开采对水资源的赋存和循环产生相当程度的破坏, 直接威胁着对水资源依赖性较强的地球表层植被生态, 使得生态进一步脆弱化, 给当地土地生态系统带来荒漠化等生态隐忧^[37-39]。

因而, 恢复力的定量测度就显得十分必要。恢复力的测度结果可以用于判定系统能否抵抗采矿扰动、系统能否在人工或者自然修复作用下恢复到人们期望的状态, 从而为土地复垦与生态修复提供依据。根据恢复力的形成机制和动力学表现, 定量测度恢复力需要首先确定系统的状态变量及参数变量, 即, 确定土地生态系统管理者所关注的对象或者部分, 并确定影响这个对象或部分的关键因素。然后, 确定使得系统状态发生改变的关键因素的阈值, 如, 决定地带性植被生存的潜水平深阈值、种子定植的坡度阈值。最后, 判定在某个扰动强度下, 关键因素的取值离阈值的距离, 这个距离的大小即可以表示土地生态系统对某个扰动的恢复力的大小。因此, 阈值测定是最为关键的步骤, 其测度可以采用梯度观测、数值模拟、控制实验、时序分析等方法。

但现实情况中, 单个扰动可能扰动了土地生态系统的多个参数变量, 如裂缝使得径流、土壤理化性质发生改变。这种情况下, 阈值效应则较为复杂, 受参数变量个数、变量间关系、变量的时空尺度的影响。特别是我国西部生态脆弱区, 植被与水是生态保护的关键, 测度恢复力时应从地质生态学角度识别植被和水这两个关键变量的时空依赖关系和变化阈值, 为保水采煤的工程布局提供依据。采矿过程中, 地表生态系统还可能会遭受土壤压实、水土污染、沉陷积水、气候变化、生态工程等多种生态扰动^[1], 因而矿山扰动通常具有类型复合性、时空复合性, 这为恢复力的定量测度带来挑战。这种情况下, 可以采用替代指标方法, 即, 不直接测度参数变量的阈值, 而是利用多个替代指标来间接评价土地生态系统对扰动的恢复力。

4.2 恢复力的调控技术

从多年的土地复垦与生态修复实践来看, 并不是所有的采矿扰动都会造成大规模的生态退化, 也不是所有的生态修复都需要大规模的人工投入, 一些大规模投入的生态工程也面临再次退化的风险^[9, 15]。恢复力机制成为理解和调控土地生态系统的关键。因此, 恢复力调控则是依据系统恢复力机制实施生态系统修复和保护的过程。

恢复力的作用是使得土地生态系统保持其状态。但一些状态, 如污染、损毁状态, 并不是人们所期待的, 这些状态也有保存自身的恢复力。对于管理者来

说,恢复力有正负之分。人们通常希望利用或者改造恢复力来保存期待的状态,如生产力较高的农地、林地状态。因此,恢复力调控可以分为(负)恢复力克服、(正)恢复力强化2种。如,当土地生态系统处于退化状态,如污染或者挖损裸地状态,恢复力调控需要克服系统保存其退化状态的能力,使系统能够更快地转移到期待的状态;当土地生态系统处于较好的状态,如复垦的高产农地,恢复力调控需要强化系统保存其较好状态的能力,使系统在面临自然灾害或人为扰动时能够保存高产农地状态。

从模拟得到的恢复力机制来看,恢复力调控的措施主要是对系统状态变量的参数变量及其阈值、状态-参数变量间关系进行调控。在干旱半干旱地区,为保存地带性植被,提高其对潜水疏排的恢复力,主要措施是保存或改善潜水利藏情况、提高植被自身的抗旱能力。如,通过有限扰动采矿、含水层再造、区域地下水连通补给、导水裂隙抑制、土壤水分在降雨驱动下的自然恢复等技术使得地带性植被所依赖的土壤含水量不突破生态阈值。当调控状态变量,如,大量增加植株数量,尽管可以短期内改变土地生态系统表现,但状态变量仍然受控于参数变量,一旦发生改变参数变量的扰动,土地生态系统状态仍然面临退化的风险。因此,在生态建设中利用和调控状态变量与其参数变量的时空关系,如植被-水-土-大气、土壤水-大气降水-潜水-地下水的时空关系十分重要,可以降低生态建设的盲目性和风险程度。

从恢复力调控的时点来看,主要是在采矿扰动前强化原状土地生态系统的恢复力,使之能够抵抗采矿扰动;在采矿扰动后克服退化土地生态系统恢复力,使之脱离退化状态;在修复后强化已修复土地生态系统恢复力,使之在面临未来的气候变化、自然灾害和人为干扰时持续保存状态并发挥生态功能。本文所揭示的恢复力机制是基于简化模型得到的基本原理,在现实情况中,恢复力机制较为复杂,恢复力调控涉及到系统多要素、时空多尺度、社会经济多维度等问题^[40]。因而,恢复力调控需要与具体工程技术相结合,如保水采煤、污染防治、植被建设、土地整治,才能很好地优化具体工程技术、发挥恢复力的理论价值。

5 结 论

(1)分析了矿山土地生态系统的动力学结构,表明系统是自组织的,且受到采矿、生态修复、随机因素的扰动,土地生态系统能否抵抗扰动、扰动能否恢复到平衡状态、并长期保持自身状态和结构,恢复力是关键因素。

(2)基于实验区的基础数据和数值模拟结果揭示了恢复力的动力学表现。恢复力是一种动力学属性,可以被理解为系统的一种内在能力,这种能力表现为:土地生态系统在面临扰动时,通过自组织使得系统的平衡解和定性结构不发生改变,从而保持系统的状态、结构和功能。

(3)揭示了恢复力的基本性质。不同情景下,恢复力大小不同,恢复力具有可塑性。参数变量是决定恢复力大小的重要因素,其阈值空间是测度恢复力大小的直接指标;根据管理者的需求,恢复力有正负之分,调控恢复力的关键是在恢复力克服或强化过程中对参数变量及其阈值、状态-参数变量间关系进行调控。

(4)实现近零生态损害的资源开采、国土空间生态的系统修复,恢复力可以作为核心准则,未来需要加强研究不同采矿和本底自然条件下,土地生态系统恢复力的测度、调控和建设方法,并在与采矿活动和环境保护的具体工程中大力推进恢复力机制的技术应用和集成。

参考文献 (References):

- [1] 杨永均,张绍良,侯湖平,等. 煤炭开采的生态效应及其地域分异[J]. 中国土地科学,2015,29(1):55-62.
YANG Yongjun,ZHANG Shaoliang,HOU Huping, et al. The ecological impacts of coal mining and the regional differentiation [J]. China Land Science,2015,29(1):55-62.
- [2] CHUGH Yoginder P. Concurrent mining and reclamation for underground coal mining subsidence impacts in China [J]. International Journal of Coal Science & Technology,2018,5(1):18-35.
- [3] 王金华,谢和平,刘见中,等. 煤炭近零生态环境影响开发利用理论和技术构想[J]. 煤炭学报,2018,43(5):1198-1209.
WANG Jinhua,XIE Heping,LIU Jianzhong, et al. Coal development and utilization theory and technical system of near-zero ecological environment impact [J]. Journal of China Coal Society,2018,43(5):1198-1209.
- [4] TAO Shengli,FANG Jingyun,ZHAO Xia, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2015,112(7):2281-2286.
- [5] 范立民,向茂西,彭捷,等. 西部生态脆弱矿区地下水对高强度采煤的响应[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2672-2678.
FAN Limin, XIANG Maoxi, PENG Jie, et al. Groundwater response to intensive mining in ecologically fragile area [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(11):2672-2678.
- [6] HE Yiming, HE Xiao, LIU Zherong, et al. Coal mine subsidence has limited impact on plant assemblages in an arid and semi-arid region of Northwestern China [J]. Ecoscience,2017,24(3-4):91-103.
- [7] 台晓丽,胡振琪,陈超. 西部风沙区不同采煤沉陷区土壤水分中子仪监测[J]. 农业工程学报,2016,32(15):225-231.

- TAI Xiaoli, HU Zhenqi, CHEN Chao. Monitoring soil moisture at different subsidence areas of mining in western windy and sandy region with neutron instrument [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(15): 225-231.
- [8] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223-232.
- WANG Jinman, GUO Lingli, BAI Zhongke, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 223-232.
- [9] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1751-1757.
- HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Selfhealing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751-1757.
- [10] 张绍良, 米家鑫, 侯湖平, 等. 矿山生态恢复研究进展——基于连续三届的世界生态恢复大会报告 [J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5611-5619.
- ZHANG Shaoliang, MI Jiaxin, HOU Huping, et al. Research progress on mining ecological restoration: Based on the report of three consecutive world ecological restoration conferences [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5611-5619.
- [11] DOLEY David, AUDET Patrick. Adopting novel ecosystems as suitable rehabilitation alternatives for former mine sites [J]. Ecological Processes, 2013, 2(1): 1-11.
- [12] JUWARKAR A ASHA, YADAV Santosh Kumar, THAWALE P R, et al. Developmental strategies for sustainable ecosystem on mine spoil dumps: A case of study [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2009, 157(1-4): 471-481.
- [13] SCHLADWEILER B K. 40 years of the surface mining control and reclamation act (SMCRA): What have we learned in the State of Wyoming [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(1): 3-7.
- [14] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例 [J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875.
- BAI Zhongke, ZHAO Jingkui, LI Jinchuan, et al. Ecosystem damage in a large opencast coal mine——A case study on Pingshuo surface coal mine, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(6): 870-875.
- [15] 卞正富, 雷少刚, 金丹, 等. 矿区土地修复的几个基本问题 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 190-197.
- BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land remediation [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 190-197.
- [16] 张绍良, 杨永均, 侯湖平. 新型生态系统理论及其争议综述 [J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5307-5314.
- ZHANG Shaoliang, YANG Yongjun, HOU Huping. Overview of novel ecosystems theory and its critiques [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5307-5314.
- [17] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973, 4(4): 1-23.
- [18] 闫海明, 战金艳, 张韬. 生态系统恢复力研究进展综述 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 303-314.
- YAN Haiming, ZHAN Jinyan, ZHANG Tao. Review of ecosystem resilience research progress [J]. Progress in Geography, 2012, 31(3): 303-314.
- [19] WALKER Brain, HOLLING Stanley, CARPENTER Stephen, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems [J]. Ecology & Society, 2004, 9(2): 3438-3447.
- [20] GUNDERSON Lance H. Ecological resilience-in theory and application. [J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 2000, 31(31): 425-439.
- [21] YANG Yongjun, LI Yue, CHEN Fu, et al. Regime shift and redevelopment of a mining area's socio-ecological system under resilience thinking: A case study in Shanxi Province, China [J]. Environment Development & Sustainability, 2019, 21(5): 2577-2598.
- [22] WASYLYCIALEIS Joseph, FITZPATRICK Patricia, FONSECA Alberto. Mining communities from a resilience perspective: Managing disturbance and vulnerability in Itabira, Brazil [J]. Environmental Management, 2014, 53(3): 481-495.
- [23] YANG Yongjun, ERSKINE Peter D, ZHANG Shaoliang, et al. Effects of underground mining on vegetation and environmental patterns in a semi-arid watershed with implications for resilience management [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(17): 1-12.
- [24] 王丽, 雷少刚, 卞正富. 多尺度矿区植被生态系统恢复力定量测度研究框架 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5): 76-80.
- WANG Li, LEI Shaogang, BIAN Zhengfu. Research framework for quantitative measurement of mine vegetation ecosystem resilience in multi scale [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5): 76-80.
- [25] FAN Limin, MA Xiongde. A review on investigation of water-preserved coal mining in western China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(4): 411-416.
- [26] 李涛, 王苏健, 韩磊, 等. 生态脆弱矿区松散含水层下采煤保护土层合理厚度 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 98-105.
- LI Tao, WANG Sujian, HAN Lei, et al. Reasonable thickness of protected loess under loose aquifer in ecologically fragile mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 98-105.
- [27] 马雄德, 范立民, 严戈, 等. 植被对矿区地下水位变化响应研究 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 44-49.
- MA Xiongde, FAN Limin, YAN Ge, et al. Vegetation responses to groundwater level change in mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 44-49.
- [28] 傅伯杰. 土地生态系统的特征及其研究的主要方面 [J]. 生态学杂志, 1985(1): 35-38.
- FU Bojie. Characteristics of land ecosystem and main aspects of their research [J]. Journal of Ecology, 1985(1): 35-38.
- [29] 曾晓东, 王爱慧, 赵钢, 等. 草原生态动力学模式及其实际检验 [J]. 中国科学(C辑: 生命科学), 2004, 34(5): 481-486.
- ZENG Xiaodong, WANG Aihui, ZHAO Gang, et al. Grassland ecological dynamics model and its actual test [J]. Science in Chi-

- na Ser. C Life Science, 2004, 34(5):481-486.
- [30] 杨永均. 矿山土地生态系统恢复力及其测度与调控研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2017:51-83.
YANG Yongjun. Study on the resilience of land ecosystem in mining area and its measurement and regulation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017:51-83.
- [31] 盖拉德·泰休. 常微分方程与动力系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2011:20-60.
- [32] BEDDINGTON J R, FREE C A, LAWTON J H. Concepts of stability and resilience in predator-prey models[J]. Journal of Animal Ecology, 1976, 45(3):791-816.
- [33] LEI Shaogang, REN Lixin, BIAN Zhengfu. Time-space characterization of vegetation in a semiarid mining area using empirical orthogonal function decomposition of MODIS NDVI time series[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6):516.
- [34] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1):35-43.
XIE Xianli, SUN Bo, ZHOU Huizhen, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):35-43.
- [35] 毕银丽, 邹慧, 彭超, 等. 采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2):490-496.
BI Yinli, ZOU Hui, PENG Chao, et al. Effects of mining subsidence on soil water movement in sandy area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2):490-496.
- [36] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(12):4156-4163.
HUANG Mei, JI Jinjun, CAO Mingkui, et al. Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12):4156-4163.
- [37] 范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):27-35.
FAN Limin. Scientific connotation of water-preserved mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):27-35.
- [38] 王强民, 赵明. 干旱半干旱区煤炭资源开采对水资源及植被生态影响综述[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):77-81.
WANG Qiangmin, ZHAO Ming. Effects of coal resources exploitation on the water resource and vegetation in arid and semi-arid region[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(3):77-81.
- [39] 孙亚军, 张梦飞, 高尚, 等. 典型高强度开采矿区保水采煤关键技术与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):56-65.
SUN Yajun, ZHANG Mengfei, GAO Shang, et al. Water-preserved mining technology and practice in typical high intensity mining area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):56-65.
- [40] SKOUSEN Jeff, ZIPPER CARL E. Post-mining policies and practices in the Eastern USA coal region[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(2):135-151.